

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

**KONTROLA KVALITETE ISPITIVANJA ZA ODREĐIVANJE POSMIČNE  
ČVRSTOĆE TLA METODOM IZRAVNOG POSMIKA**

Diplomski rad

Tena Perić

R 159

Zagreb, 2018.

### ***Zahvala:***

*Zahvaljujem se svojim mentorima, Dr. sc. Biljani Kovačević Zelić s Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta i Dr. sc. Igoru Sokoliću iz tvrtke Geotehnički studio d.o.o., na stručnim savjetima, uloženom trudu i vremenu, strpljenju te pristupačnosti s kojom su pristupili tijekom cijele izrade ovog diplomskog rada.*

*Zahvaljujem se Dr. Sc. Karolini Gradiški i Dipl. ing. Evelini Oršulić s Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, te Dipl. ing. rud. Ivani Dobrilović i Dipl. ing. rud. Aleksandru Joviću iz tvrtke Geotehnički studio d.o.o., na prijateljskom pristupu, bezbrojnim savjetima i pomoći tijekom cijele izrade ovog rada.*

KONTROLA KVALITETE ISPITIVANJA ZA ODREĐIVANJE POSMIČNE  
ČVRSTOĆE TLA METODOM IZRAVNOG POSMIKA

TENA PERIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U ovom radu opisana je provedba kontrole kvalitete laboratorijskih ispitivanja posmične čvrstoće tla, te su usporedno prikazani rezultati svih ispitivanja koja su provedena na uzorku gline, sukladno zahtjevima normi. Pokusi provedeni u akreditiranom laboratoriju tvrtke Geotehnički studio d.o.o. i laboratoriju Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta u Zagrebu. Kontrola kvalitete rezultata analizirana je s polazišta ponovljivosti i obnovljivosti, te međulaboratorijske usporedbe. Ispitivanja su provedena na uzorku modelarske gline za komercijalnu upotrebu. Osim provedbe ispitivanja izravnog posmika, provedena su još i sljedeća ispitivanja: određivanje vlažnosti, određivanje zapreminske težine, određivanje gustoće čvrstih čestica, određivanje Atterbergovih granica te određivanje granulometrijskog sastava tla metodom areometriranja. Rezultati ispitivanja dobiveni u ova dva laboratorija međusobno su uspoređeni i analizirani, te pokazuju da su odstupanja u dopuštenim granicama prema normi.

Ključne riječi: kontrola kvalitete, međulaboratorijska ispitivanja, ponovljivost, obnovljivost, izravni posmik.

Diplomski rad sadrži: 46 stranica, 38 slika, 2 tablice, 10 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Pierottijeva 6, Zagreb.

Voditelj: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, red. prof. RGNF

Pomoć pri izradi: Dr. Sc. Karolina Gradiški, asistentica RGNF  
Dipl. ing. Evelina Oršulić, RGNF  
Dr. sc. Igor Sokolić, Geotehnički studio d.o.o.  
Dipl. ing. rud. Ivana Dobrilović, Geotehnički studio d.o.o.  
Dipl. ing. rud. Aleksandar Jović, Geotehnički studio d.o.o.

Ocjenjivači: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, red. prof. RGNF  
Dr. sc. Petar Hrženjak, izv. prof.  
Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Datum obrane: 22. veljače 2018.

## QUALITY CONTROL OF SHEAR STRENGTH TESTINGS OF SOIL SAMPLES BY DIRECT SHEAR METHOD

TENA PERIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Institute of Mining and Geotechnics  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

### Abstract

The implementation of quality control results was described in this thesis, and the results of all tests carried out on the clay sample were parallelly shown, in accordance with the standard requirements in the accredited laboratory at Geotehnički studio d.o.o., and at the laboratory of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering in Zagreb. The quality of results was analyzed from the point of repeatability and reproducibility, and interlaboratory comparison. The tests were done on the clay sample for commercial use. Besides direct shear test, the following tests were also carried out: determination of water content, calculation of unit weight, determination of the specific density of solid particles, Atterberg limits and hydrometer test. The test results from both laboratories were compared analysed, and they have shown that the deviations are within acceptable limits, according to the standards.

Keywords: quality control, interlaboratory testing, repeatability, reproducibility, direct shear.

Thesis contains: 46 pages, 38 figures, 2 tables, 10 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, Zagreb.

Supervisor: PhD Biljana Kovačević Zelić, Full Professor

Technical support and assistance: PhD Karolina Gradiški, assistant RGNF  
Evelina Oršulić, B. Sc., RGNF  
PhD Igor Sokolić, Geotehnički studio d.o.o.  
Ivana Dobrilović, Min. Eng., Geotehnički studio d.o.o.  
Aleksandar Jović, Min. Eng., Geotehnički studio d.o.o.

Reviewers: PhD Biljana Kovačević Zelić, Full professor  
PhD Petar Hrženjak, Associate Professor  
PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor

Date of defense: February 22, 2018.

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA .....	II
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICE.....	III
1. UVOD.....	1
2. KONTROLA KVALITETE REZULTATA U LABORATORIJU.....	3
2.1. Međulaboratorijska usporedba.....	4
2.2. Kontrola kvalitete rezultata s polazišta ponovljivosti i obnovljivosti.....	8
2.3. Statistička obrada podataka .....	10
3. KARAKTERISTIKE UZORKA.....	13
3.1. Fizičke karakteristike uzorka.....	12
3.2. Homogenost uzorka.....	24
3.3. Određivanje čvrstoće tla metodom izravnog posmika.....	29
4. ANALIZA REZULTATA IZRAVNOG POSMIKA.....	38
4.1. Rezultati ispitivanja za prvog ispitivača.....	39
4.2. Rezultati ispitivanja za drugog ispitivača.....	39
4.3. Rezultati ispitivanja za trećeg ispitivača.....	40
4.4. Usporedba rezultata ispitivanja izravnog posmika.....	41
5. ZAKLJUČAK.....	44
6. LITERATURA.....	46

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Prikaz slijedne sheme.....	7
Slika 2-2. Prikaz istodobne sheme.....	7
Slika 3-1. (a) Digitalna vaga.....	13
Slika 3-1. (b) Miješanje suspenzije.....	14
Slika 3-2. Piknometri u pješčanoj kupelji.....	14
Slika 3-3. Vrijednosti gustoće čvrstih čestica.....	15
Slika 3-4. Granice plastičnih stanja.....	16
Slika 3-5. (a) Priprema uzorka za Casagrandeov pokus.....	18
Slika 3-5. (b) Casagrandeov uređaj s uzorkom.....	18
Slika 3-6. Priprema valjčića.....	19
Slika 3-7. Vrijednosti rezultata indeksa plastičnosti.....	19
Slika 3-8. Primjer dobivenog rezultata granice tečenja na uzorku Geotehnički studio uzorak 3.....	21
Slika 3-19. Klasifikacija uzorka Geotehnički studio uzorak 3 pomoću dijagrama plastičnosti.....	21
Slika 3-10. Postupak areometriranja.....	22
Slika 3-11. Rezultat areometriranja u Laboratoriju 1.....	23
Slika 3-12. Rezultat areometriranja u Laboratoriju 2.....	24
Slika 3-13. Posudica s uzorkom za određivanje vlažnosti.....	25
Slika 3-14. Sušionik.....	26
Slika 3-15. Vrijednosti rezultata vlažnosti.....	26
Slika 3-16. Uzorak ugrađen u prsten.....	27
Slika 3-17. Rezultati ispitivanja zapreminske težine.....	28
Slika 3-18. Pravac čvrstoće i parametri čvrstoće.....	29
Slika 3-19. Dijelovi uređaja za izravni posmik.....	32
Slika 3-20. (a) Uzorak kaolinske gline proizveden za komercijalnu upotrebu.....	33
Slika 3-20. (b) Podjela uzorka.....	33
Slika 3-21. (a) Potreban pribor prilikom ugradnje.....	34
Slika 3-21. (b) Uzorak ugrađen u prsten.....	34
Slika 3-22. (a) Utiskivanje uzorka u kalup.....	34
Slika 3-28. (b) Ugrađen uzorak u kalup.....	34
Slika 3-23. Postavljen kalup u uređaj za izravan posmik.....	35
Slika 3-24. Prikaz rezultata pokusa izravnog posmika.....	36
Slika 4-1. Tri uređaja za izravni posmik u Laboratoriju 2.....	39
Slika 4-2. Prikaz rezultata ispitivanja izravnog posmika od Ispitivača 1 u Laboratoriju 2.....	40
Slika 4-3. Prikaz rezultata ispitivanja izravnog posmika od ispitivača 2 u Laboratoriju 2.....	41
Slika 4-4. Prikaz rezultata ispitivanja izravnog posmika od ispitivača 3 u Laboratoriju 1.....	42
Slika 4-5. Usporedba rezultata između Ispitivača 1 i Ispitivača 2.....	43
Slika 4-6. Usporedba rezultata između Ispitivača 1 i Ispitivača 3.....	44

## POPIS TABLICA

Tablica 1-1. Mjere kontrole kvalitete (Pravila za međulaboratorijske usporedbe HAA-Pr- 2/6).....	4
--	---

Tablica 3-1. Primjer dobivenih vrijednosti indeksnih pokazatelja na uzorku Geotehnički studio uzorak 3.....	20
---	----

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICE

Oznaka	Jedinica	Opis
$\bar{x}$	-	- aritmetička sredina
$x_i$	-	- rezultat ispitivanja
$n$	-	- broj ispitivanja
$S$	-	- standardno odstupanje
$S_r$	-	- ponovljivost
$S_R$	-	- obnovljivost
$\rho_s$	$g/m^3$	- gustoća čestica tla
$m_s$	$g$	- masa čvrstih čestica
$V_s$	$m^3$	- volumen čvrstih čestica
$I_p$	-	- indeks plastičnosti
$w_l$	-	- granica tečenja
$w_p$	-	- granica plastičnosti
$I_C$	-	- indeks konzistencije
$w_o$	-	- prirodna vlažnost
$w_s$	-	- granica stezanja
$I_L$	-	- indeks tečenja
$w$	%	- vlažnost
$m_w$	$g$	- masa vode
$\Gamma$	$kN/m^3$	- zapreminska težina
$m$	$g$	- masa uzorka
$g$	$m/s^2$	- akceleracija sile teže
$P$	$g/m^3$	- gustoća uzorka
$V$	$m^3$	- volumen uzorka
$R_d$	$mm/min$	- brzina smicanja
$d_h$	$mm$	- relativni bočni pomak
$t_e$	$min$	- proteklo vrijeme
$\tau$	$kPa$	- posmično naprezanje
$T$	$kN$	- posmična sila
$A$	$m^2$	- površina
$\sigma_n$	$kPa$	- normalno naprezanje
$N$	$kN$	- vertikalna sila
$P_d$	%	- postotak relativnog bočnog pomaka
$D$	$mm$	- promjer uzorka



## 1. UVOD

Kontrola kvalitete rezultata ispitivanja provodi se s ciljem dokazivanja tehničke osposobljenosti laboratorija. Najbolji način dokazivanja tehničke osposobljenosti laboratorija jest sudjelovanje u programima ispitivanja sposobnosti ili vanjske procjene kvalitete. Tehnička osposobljenost može se dokazati i uspješnim sudjelovanjima u međulaboratorijskim usporedbama koje nisu ni ispitivanja sposobnosti niti vanjska procjena kvalitete, a provode se u druge svrhe. Laboratorij bi trebao sudjelovati u međulaboratorijskim usporedbama kad god je to moguće, gdje su usporedbe provedive u njegovom području akreditacije, prikladne za namjenu i ekonomski opravdane. Međulaboratorijsko ispitivanje provodi se u svrhu određivanja preciznosti metode ili u svrhu ocjene osposobljenosti laboratorija za provođenje određene metode. Važno je za postizanje i/ili poboljšanje osposobljenosti laboratorija te osiguranje kvalitete rezultata ispitivanja. Rezultati dobiveni međulaboratorijskim ispitivanjem mogu ukazati na nedostatke u laboratoriju, ali i na nedostatke u provođenju određene metode ispitivanja, što može biti važno kupcu ili akreditacijskom tijelu za usporedbu rada jednog laboratorija s drugim laboratorijem. Kontrolu kvalitete rezultata ispitivanja moguće je promatrati s posebnim skupom definiranih uvjeta, s polazišta uvjeta ponovljivosti i obnovljivosti.

U geotehnici prilikom proračunavanja nosivosti temelja, pilota, stabilnosti potpornih zidova i zagatnih stijena te stabilnosti kosina značajnu ulogu imaju parametri čvrstoće tla. Čvrstoća tla opisuje se pravcem prema Mohr-Coulombovom zakonu čvrstoće. Parametri Mohr-Coulombovog pravca čvrstoće su kohezija i kut unutarnjeg trenja. Poznavajući ta dva parametra možemo odrediti ponašanje tla preko Mohr-Coulombovog kriterija čvrstoće, koji ima široku primjenu u praksi zbog njegove jednostavnosti. Parametri čvrstoće određuju se izravnim mjerenjem na uzorcima u laboratoriju ili korelacijom s in situ ispitivanjima. U laboratoriju se najčešće koriste dva uređaja: troosni uređaj ili uređaj za izravni posmik. Iako je dovoljno ispitati dva uzorka s različitim početnim naprezanjima, radi sigurnosti se u pravilu ispituju po tri uzorka od iste vrste materijala, kako bi se preciznije odredio Mohr-Coulombov pravac čvrstoće.

U ovom radu je obrađena tema kontrole kvalitete rezultata laboratorijskih ispitivanja posmične čvrstoće metodom izravnog posmika. Kao mjere kontrole kvalitete provedene su analize rezultata s polazišta uvjeta ponovljivosti i obnovljivosti, te

međulaboratorijske usporedbe. Ispitivanja su provedena na uzorku modelarske gline, u Geomehaničkom laboratoriju na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu (u daljnjem tekstu Laboratorij 1) i Laboratoriju za ispitivanje tla i stijena trgovačkog društva Geotehnički studio d.o.o. (u daljnjem tekstu Laboratorij 2).

## **2. KONTROLA KVALITETE REZULTATA U LABORATORIJU**

Svaki laboratorij bi trebao imati jasno definirane postupke provedbe kontrole kvalitete. Postupci koji se provode s ciljem osiguranja kvalitete rezultata mogu se razlikovati od slučaja do slučaja, a obuhvaćaju slijedeće elemente (HAA, 2015):

- mjeru kontrole kvalitete rezultata;
- strategiju sudjelovanja;
- provjeravanje dostupnosti ispitivanja sposobnosti;
- izbor shema ispitivanja sposobnosti;
- izradu programa i planiranje kontrole kvalitete rezultata;
- realizaciju mjera kontrole kvalitete;
- uporabu statističkih metoda obrade podataka;
- analizu i vrednovanje rezultata;
- monitoring izvedbe mjera kontrole kvalitete rezultata;
- istraživanje uzroka neprihvatljivih i upitnih rezultata;
- poduzimanje mjera za neprihvatljive rezultate;
- izvještavanje akreditacijskog tijela.

Laboratorij bi se trebao odlučiti da će svoju kontrolu kvalitete rezultata ispitivanja/umjeravanja gdje god je to moguće, potvrđivati uspješnim sudjelovanjem u međulaboratorijskim usporedbama, a isto tako i provedbom unutarnjih i vanjskih mjera kontrole kvalitete (Tablica 1-1).

Važni čimbenici koji utječu na dobivanje valjanih rezultata su: program ispitivanja, izbor materijala za ispitivanje, broj uzoraka, upute i način provedbe, izbor laboratorija sudionika, distribucija uzoraka te prikupljanje i obrada rezultata ispitivanja.

Tablica 1-1. Mjere kontrole kvalitete (HAA, 2015)

Vanjske mjere kontrole kvalitete	Unutarnje mjere kontrole kvalitete
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ispitivanje sposobnosti</li> <li>• obnovljivost rezultata</li> <li>• ključne usporedbe</li> <li>• usporedba s drugim laboratorijem</li> <li>• mjeriteljski parametri</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• uporaba certificiranih referentnih materijala</li> <li>• uporaba referentnih materijala</li> <li>• ponovljivost rezultata</li> <li>• usporedba analiza neovisnim tehnikama</li> <li>• unutarlaboratorijska usporedba</li> <li>• ponovljeno ispitivanje/umjeravanje zadržanog predmeta</li> <li>• određivanje međusobnog odnosa rezultata za različite značajke predmeta</li> <li>• primjena kontrolnih karata</li> <li>• upotreba slijepih proba</li> </ul>

U ovom radu provedene su sljedeće mjere kontrole kvalitete rezultata na uzorku modelarske gline:

1. međulaboratorijska usporedba rezultata;
2. ponovljivost i obnovljivost rezultata;

## 2.1. MEĐULABORATORIJSKA USPOREDBA

Ispitivanja koja se provode na identičnim uzorcima u istim ili različitim laboratorijima, ne moraju nužno dati jednake rezultate. Postoji niz čimbenika koje ne možemo izravno kontrolirati a utječu na rezultata ispitivanja, kao što su: različiti ispitivač, druga oprema koja se koristi prilikom ispitivanja, kalibracija uređaja te uvjeti u kojima se provodi ispitivanje (temperatura, tlak, vlažnost prostorije i sl.). Varijabilnost rezultata

dobivenih od strane različitih osoba koja provode ispitivanje i različite opreme obično će biti veća nego kada ista osoba provodi ispitivanje koristeći istu opremu, isto kao što će i varijabilnost biti veća što je vremensko razdoblje među ispitivanjima koja se provode u istom laboratoriju veća. Međulaboratorijska usporedba pripada vanjskim mjerama kontrole kvalitete rezultata. Većina ispitivanja vanjske procjene kvalitete pripremljena su tako da se dobije bolji uvid u cjelokupan tijek aktivnosti laboratorija, a ne samo na procesa ispitivanja. Najčešće se provode kao kontinuirana ispitivanja kojima se dugoročno prati uspješnost izvedbe laboratorija. Kao važan aspekt ovih usporedbi je izobrazba sudionika i promoviranje poboljšavanja kvalitete. Laboratorij bi trebao sudjelovati u međulaboratorijskim usporedbama kad god je to moguće, gdje su te usporedbe provedive u njegovom području akreditacije, prikladne za namjenu i ekonomski opravdane (Grgić, 2014). Opći izraz za izražavanje bliskosti dobivenih rezultata stvarnoj ili referentnoj vrijednosti je točnost. *ASTM (American Society for Testing and Materials)* kvantifikaciju uspješnosti neke metode ispitivanja prikazuje pomoću dvije veličine: preciznost i odstupanje, koje predstavljaju i sastavni dio svake ASTM ispitne metode. Odstupanje kvantificira razliku između izmjerene veličine i prosječne vrijednosti, dok je preciznost raspršenosti mjerenja oko prosječne vrijednosti. Određivanje kvalitete ispitivanja prema američkim standardima propisana je normom ASTM E691. Norma je definirana minimalnim zahtjevima koje je potrebno provoditi da bi rezultati dobiveni međulaboratorijskim ispitivanjem bili valjani. Prema toj normi, minimalni broj nezavisnih laboratorija koji moraju sudjelovati u ispitivanjima je šest, a za svaki ispitni uzorak treba imati po tri mjerenja. Također, ispitni uzorak treba biti ispitan prije distribucije ostalim laboratorijima, te ga treba biti 50% više od pretpostavljene količine. Međulaboratorijsko ispitivanje obuhvaća proces organizacije, izvedbe i vrednovanja mjerenja ili ispitivanja istih ili sličnih predmeta ispitivanja u laboratorijima prema unaprijed određenim uvjetima. Najobjektivnija metoda za praćenje kontrole kvalitete rezultata je njihova analiza u međulaboratorijskim usporedbama. Osnovna primjena međulaboratorijskih usporedbi je u svrhu ispitivanja sposobnosti sudionika. Cilj ispitivanja sposobnosti nije samo pružiti informaciju o uspješnosti izvedbe određene aktivnosti sudionika već da, omogućiti sudionicima određenu izobrazbu u području ispitivanja sposobnosti u kojem su sudjelovali, ali i da dobivene informacije upotrijebe za poboljšanje kvalitete ispitivanja ili mjerenja. Informacije i rezultati koje sudionik dobije iz sudjelovanja u nekom programu ispitivanja sposobnosti mogu pružiti potvrdu tehničke osposobljenosti sudionika ili ukazati na postojanje potencijalnih problema.

Međulaboratorijska usporedba za ispitivanje sposobnosti primjenjuju se kod (HAA, 2015):

- vrednovanja izvedbi sudionika za određena ispitivanja ili mjerenja;
- otkrivanja problema u radu i pokretanje radnji poboljšanja;
- utvrđivanja učinkovitosti i usporedivosti ispitnih metoda;
- pružanja dodatnog povjerenja kupcima usluga;
- usporedbe metoda ili postupaka i otkrivanje razlika između laboratorija;
- usporedbe sposobnosti osoblja koje provodi ispitivanja;
- izobrazbe sudionika temeljene na rezultatima provedene usporedbe;
- validacije granica nesigurnosti.

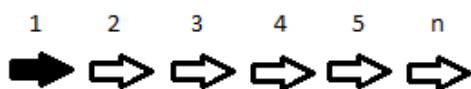
Postoje i druge primjene međulaboratorijskih usporedbi u kojima se pretpostavlja da je sudionik osposobljen, a koje se zbog toga ne smatraju ispitivanjem sposobnosti, a mogu obuhvaćati:

- vrednovanje značajki izvedbe metode;
- dodjeljivanje vrijednosti referentnim materijalima i ocjenjivanje njihove prikladnosti za uporabu u određenim postupcima ispitivanja ili mjerenja;
- potpora izjavama o ekvivalentnosti mjerenja nacionalnih mjeriteljskih tijela kroz ključne usporedbe i dodatne usporedbe provedene u ime Međunarodnog ureda za utege i mjere EURAMETA i drugih regionalnih mjeriteljskih organizacija;
- usporedbe dvaju ili više laboratorija na njihovu vlastitu inicijativu s drugim definiranim ciljem usporedbe.

Postoje različite sheme ispitivanja sposobnosti koje su svrstane u nekoliko kategorija.

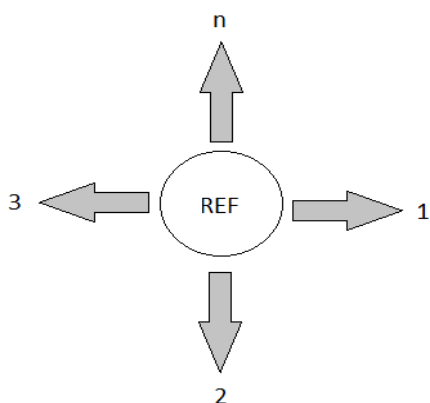
Prema raspodjeli predmeta ispitivanja sposobnosti na postoje dvije sheme:

1. Slijedne (sekvencijalne) sheme – kod kojih je raspodjela predmeta ispitivanja sposobnosti slijedna, od jednog sudionika do drugog (slika 2-1).



Slika 2-1. Prikaz slijedne sheme.

2. Istodobne (simultane) sheme – kod kojih je raspodjela slučajno odabranih predmeta ispitivanja sposobnosti (poduzoraka homogenog materijala) istovremena prema svim sudionicima (slika 2-2).



Slika 2-2. Prikaz istodobne sheme.

Prema rezultatima ispitivanja ili mjerenja dijele se na:

1. kvalitativne sheme – u kojima su rezultati opisni i daju se na nominalnoj (kategorijalnoj) ili ordinalnoj (redoslijednoj) skali;
2. kvantitativne sheme – u kojima su rezultati brojčane vrijednosti, dani u nekom intervalu ili omjeru proporcija;
3. sheme tumačenja – u kojima nema provedbe ispitivanja ili mjerenja, predmet ispitivanja sposobnosti je mjerni rezultat, skup podataka ili drugi skup informacija podvrgnut tumačenju značajki koja se tiču osposobljenosti sudionika.

Prema broju ponavljanja provedbe dijele se na:

1. jednokratne sheme – kod kojih se predmeti ispitivanja sposobnosti raspodjeljuju jednokratno;
2. kontinuirane sheme – kod kojih se predmeti ispitivanja sposobnosti raspodjeljuju redovito u određenim vremenskim intervalima.

Prema fazi obrade predmeta ispitivanja sposobnosti, dijele se na:

1. sheme prije ispitivanja ili mjerenja
2. sheme tijekom mjerenja
3. sheme poslije ispitivanja ili mjerenja

U nekim procesima ispitivanja sposobnosti, u kojima se stabilan materijal šalje sudionicima, neupotrijebljeni dio tog materijala može biti koristan za unutarnju kontrolu kvalitete rezultata kao referentni materijal. Gdje je to prikladno, referentne vrijednosti dodijeljene predmetu ispitivanja sposobnosti mogu se smatrati korisnima kao unutrašnje referentne vrijednosti za kontrolu kvalitete ispitivanja ili mjerenja, izobrazbu osoblja i slično.

## **2.2. KONTROLA KVALITETE REZULTATA S POLAZIŠTA PONOVLJIVOSTI I OBNOVLJIVOSTI**

Za određivanja preciznosti rezultata ispitivanja koristimo metode uvjeta ponovljivosti i obnovljivosti. Uvjet ponovljivosti se odnosi na uvjete gdje se neovisni ispitni rezultati dobivaju istom metodom na jednakim ispitnim elementima, u istom laboratoriju s istim ispitivačem, uporabom iste opreme u kratkom vremenskom razdoblju. Ponovljivost se može koristiti za unutarnje mjere kontrole kvalitete unutar laboratorija. Za razliku od uvjeta ponovljivosti, uvjeti obnovljivosti zahtijevaju različitog ispitivača,



različitu opremu, isti uzorak te istu metodu mjerenja. Vanjske mjere kontrole kvalitete se mogu promatrati s aspekta obnovljivosti. Prilikom provođenja ispitivanja ponovljivosti i obnovljivosti, norma ASTM E-691 zahtijeva da se prethodno ispita uzorak i dokaže njegova homogenost. Rezultati ispitivanja ponovljivosti i obnovljivost ne moraju nužno značiti samo usporedbu izvedbe i usporedbu ispitivača, već mogu pružiti i podatke o njihovim nedostacima te ukoliko je potrebno poduzeti potrebne mjere poboljšanja kvalitete rezultata, kao što su: izobrazba osoblja, kalibracija i slično.

U ovom radu, kontrola kvalitete rezultata s polazišta ponovljivosti i obnovljivosti prikazana je na rezultatima ispitivanja izravnog posmika, te je homogenost dokazana temeljem vlažnosti i zapreminske težine uzorka.

### 2.3. STATISTIČKA OBRADA PODATAKA

Zahtjevi i organizacija provedbe međulaboratorijske usporedbe propisana je standardnom metodom za određivanje kvalitete ispitivanja, normom *ASTM E 691 99 Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method*. Norma definira minimalne zahtjeve koje je potrebno zadovoljiti da bi rezultati dobiveni međulaboratorijskim ispitivanjem bili valjani. Primjerice, kao minimalni broj nezavisnih laboratorija koji moraju sudjelovati u provedbi navodi se broj šest, a za svaki ispitni uzorak treba imati namanje tri mjerenja. Rezultati ispitivanja često se moraju prikazati uz korištenje statističke obrade radi lakšeg tumačenja i mogućnosti usporedbe sa zadanim ciljevima. Cilj je da se utvrdi odstupanje od dodijeljene vrijednosti na način kako bi se omogućila usporedba s kriterijima izvedbe. Prema normi ASTM E 691 – 99, koristi se metoda aritmetičke sredine i standardne devijacije (odstupanja).

Aritmetička sredina:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-1)$$

gdje je:

$\bar{x}$  – aritmetička sredina

$x_i$  – rezultat ispitivanja

$n$  – broj ispitivanja

Standardno odstupanje:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-2)$$

gdje je:

$s$  – standardno odstupanje

Za određivanje standardnog odstupanja ocjenjivanja sposobnosti može se koristiti nekoliko pristupa:

- propisana vrijednost;
- percepcijski pristup;
- iz općeg modela (jednadžba 2-2);
- iz rezultata preciznog eksperimenta;
- iz rezultata dobivenih u krugu ispitivanja sposobnosti.

Izraz za određivanje ponovljivosti:

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n s^2}{n}} \quad (2-3)$$

gdje je:

$s_r$  – ponovljivost

Izraz za određivanje obnovljivost:

$$s_R = \sqrt{\frac{s^2 + (s_r)^2(n-1)}{n}} \quad (2-4)$$

gdje je:

$s_R$  - obnovljivost

Svi rezultati su povjerljivi, tako da niti jedan laboratorij ne bi smio imati rezultate drugih. Na temelju individualno dobivenih rezultata laboratoriji odlučuju o mogućim popravnim radnjama kako bi se unaprijedili postupci ispitivanja.

### **3. KARAKTERISTIKE UZORKA**

Od laboratorijskih ispitivanja kojima su određene fizičke karakteristike uzorka, provedena su sljedeća ispitivanja:

- Određivanje gustoće čvrstih čestica;
- Određivanje Atterbergovih granica;
- Određivanje granulometrijskog sastava.

Homogenost uzorka dokazana je sljedećim laboratorijskim ispitivanjima:

- Određivanje vlažnosti;
- Određivanje zapreminske težine.

#### **3.1. FIZIČKE KARAKTERISTIKE UZORKA**

Sva ispitivanja u oba laboratorija provedena su prema istim normama, uz drugog ispitivača, na homogenom uzorku modelarske gline.

##### **3.1.1. Određivanje gustoće čvrstih čestica**

Gustoća čvrstih čestica određena je prema normi ASTM D 854-14 (metoda B). Prije početka ispitivanja potrebno je provjeriti masu suhog i čistog piknometra. Ukoliko je razlika mase u odnosu na srednju vrijednost kalibrirane mase veća od 0,06 g, potrebno je ponoviti kalibraciju. Nakon kontrole mase piknometra može se započeti s postupkom ispitivanja uzorka tla. Prethodno osušen uzorak na temperaturi 105°C-110°C tijekom 24 sata potrebno je usitniti i staviti približno 35 g uzorka u piknometar, korištenjem precizne vage koja mjeri na stotine grama (slika 3-1(a)). Dodaje se destilirana voda do približno  $\frac{3}{4}$  volumena piknometra. Zatim se izrađuje suspenzija potresanjem piknometra (slika 3-1 (b)).

Piknometar sa suspenzijom se stavlja u pješčanu kupelj i zagrijava na 105°C, da se iz pora uzorka ukloni sav zrak i pore popune vodom (slika 3-2). Nakon faze zagrijavanja piknometar je potrebno ohladiti na sobnu temperaturu i zatim mu dodati destiliranu vodu do oznake. Piknometar ostaviti preko noći u termoizoliranom spremniku kako bi se sadržaj piknometra temperaturno izjednačio. Nakon toga određujemo masu piknometra i njegovog sadržaja. Zatim se određuje suha masa ispitanog uzorka tla ( $m_s$ ), na način da se suspenzija iz piknometra izlije u laboratorijsku čašu, uz ispiranje destiliranom vodom, te osuši na temperaturi od 110°C. Volumen čvrstih čestica određuje se tako što zrna uzorka istisnu toliko vode koliki je njihov volumen. Volumen istisnute vode odredimo preko mase vode koja je jednaka razlici zbroja mase piknometra s vodom i mase piknometra s uzorkom u vodi.

Gustoća čestica tla određuje se korištenjem izraza:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \left[ \frac{g}{m^3} \right] \quad (3-1)$$

gdje je:

$m_s$  – masa čvrstih čestica [g]

$V_s$  - volumen čvrstih čestica [ $m^3$ ]



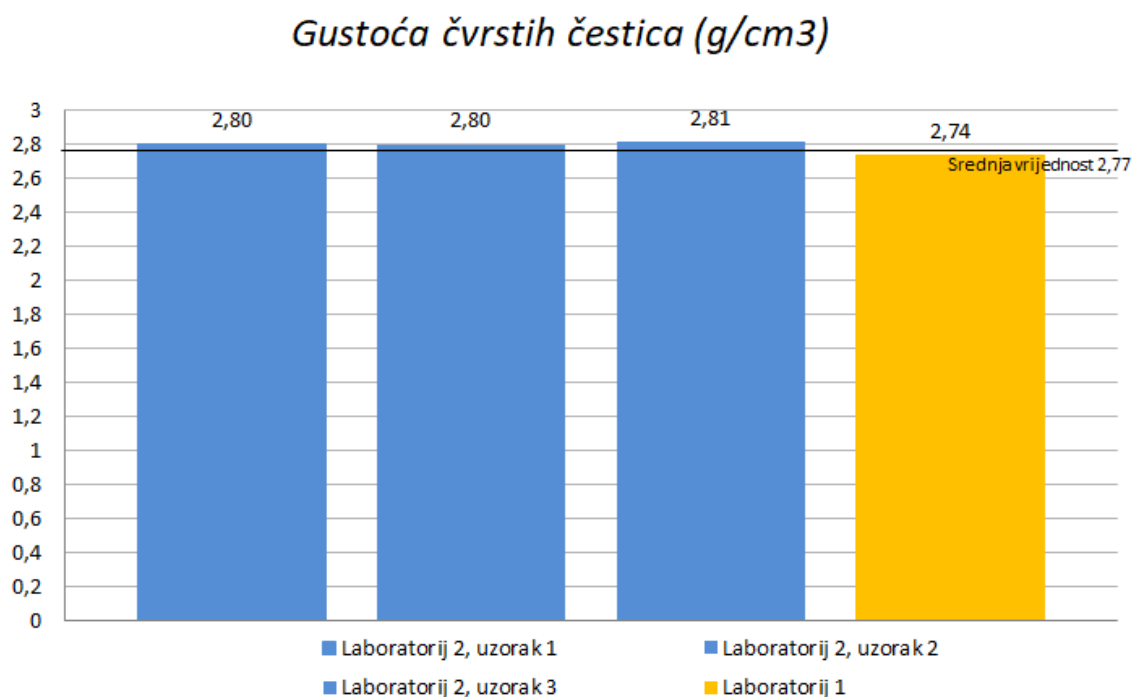
Slika 3-1. a) Digitalna vaga, b) Miješanje suspenzije



Slika 3-2. Piknometri u pješčanoj kupelji

### *Analiza rezultata određivanja gustoće čvrstih čestica*

Gustoća čvrstih čestica modelarske gline ispitana je na jednom uzorku u Laboratoriju 1 i na tri uzorka u Laboratoriju 2. Ispitivanje se provodilo u oba laboratorija prema normi ASTM 854 – 14 korištenjem druge opreme uz drugog ispitivača.



Slika 3-3. Vrijednosti gustoće čvrstih čestica

Analizom dobivenih rezultata ispitivanja gustoće čvrstih čestica u oba laboratorija (slika 3-3), prema normi ASTM 854 – 14, može se zaključiti da odstupanja rezultata zadovoljavaju propisanu normu. Prema normi dozvoljeno odstupanje između rezultata za ispitivanja provedena u istom laboratoriju iznosi 0,02 g pa se može uočiti da ispitivanja provedena u Laboratoriju 2 zadovoljavaju taj kriterij. Dobivena srednja vrijednost u Laboratoriju 2 iznosi 2,80 g/cm<sup>3</sup>, dok je dobivena vrijednost u Laboratoriju 1 iznosila 2,74 g/cm<sup>3</sup> što prema normi ulazi u dozvoljeno odstupanje rezultata od 0,06 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.1.2 Određivanje Atterbergovih granica

Prema jedinstvenom sustavu klasifikacije, koherentna tla se klasificiraju korištenjem granica plastičnosti, a klasifikacija nekoherentnih materijala obavlja se prema granulometrijskom sastavu. Fizikalne osobine glina mijenjaju se sa sadržajem vode. Granice plastičnih stanja su (slika 3-4):

- $w_s$  – granica stezanja;
- $w_p$  – granica plastičnosti;
- $w_l$  – granica tečenja.

Poznavanjem granica plastičnosti ( $w_p$ ) i granica tečenja ( $w_l$ ), koherentan materijal se može klasificirati u određene skupine prema plastičnosti. Za tu vrstu klasifikacije potrebno je poznavati indeks plastičnosti ( $I_p$ ).

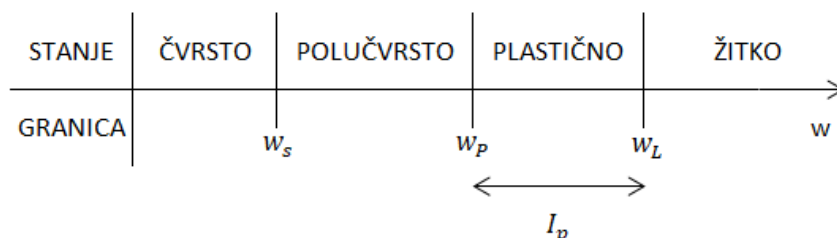
$$I_p = w_l - w_p \quad (3-2)$$

gdje je:

$I_p$  – indeks plastičnosti;

$w_l$  – granica tečenja;

$w_p$  – granica plastičnosti.



Slika 3-4. Granice plastičnih stanja



Uz navedene granice plastičnosti, važan je i indeks konzistencije ( $I_C$ ). Indeks konzistencije kreće se u granicama od nule do jedinice. Što je vrijednost indeksa konzistencije veća, to je materijal manje deformabilan.

$$I_C = \frac{w_l - w_o}{I_p} \quad (3-3)$$

gdje je:

$I_C$  – indeks konzistencije;

$w_o$  – prirodna vlažnost;

$I_p$  – indeks plastičnosti;

$w_l$  – granica tečenja.

Suprotno indeksu konzistencije je indeks tečenja ( $I_L$ ):

$$I_L = \frac{w_o - w_p}{I_p} \quad (3-4)$$

gdje je:

$I_L$  – indeks tečenja;

$w_o$  – prirodna vlažnost;

$I_p$  – indeks plastičnosti;

$w_p$  – granica plastičnosti.

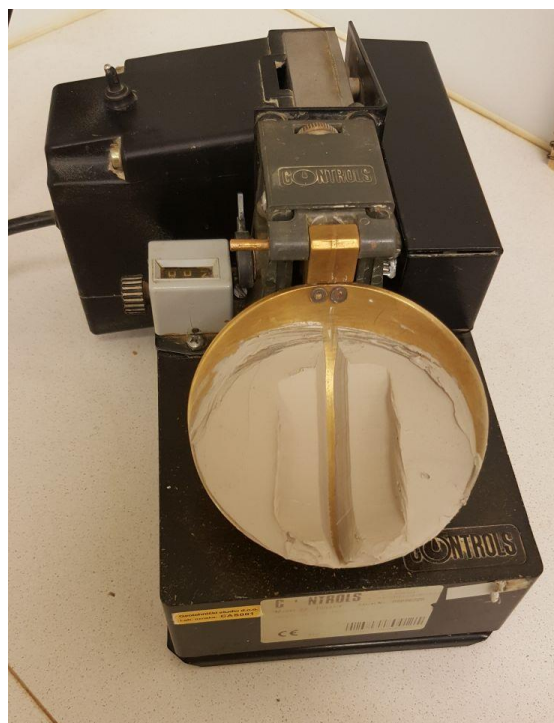
Postupak određivanja Atterbergovih granica izvodi se prema normi ASTM D 4318-10. Određuju se granica tečenja i granica plastičnosti.

### Granica tečenja ( $w_D$ )

Granica tečenja se određuje pomoću Casagrandeovog uređaja. Pomoću ekscentra na osovini, zdjelica se podiže na visinu od 1 cm s koje slobodno pada na podlogu. Pokus započinje usitnjavanjem uzorka, zatim slijedi homogeniziranje uz dodavanje vode (slika 3-5 (a)). Kada je uzorak postavljen u zdjelicu, napravi se žlijeb posebnim nožem (slika 3-5 (b)). Zatim se uređaj pokrene te zdjelica udara o podlogu brzinom od 2 udarca u sekundi, dok se žlijeb ne sastavi na duljinu od 12 mm. Broj udaraca ne smije biti manji od 15, niti veći od 35. Zapisuje se broj udaraca, te se iz spojenog dijela uzima dio tla i određuje se njegova vlažnost. Pokus se ponavlja na više uzoraka istog materijala, kojima se postepeno povećava vlažnost dodavanjem vode. Potrebno je dobiti tri točke, kako slijedi:

1. Broj udaraca između 25 i 35;
2. Broj udaraca između 20 i 30;
3. Broj udaraca između 15 i 25.

Granica tečenja je ona vlažnost uzorka koja odgovara rezultatu od 25 udaraca.



Slika 3-5. a) Priprema uzorka za Casagrandeov pokus, b) Casagrandeov uređaj s uzorkom

### **Granica plastičnosti ( $w_p$ )**

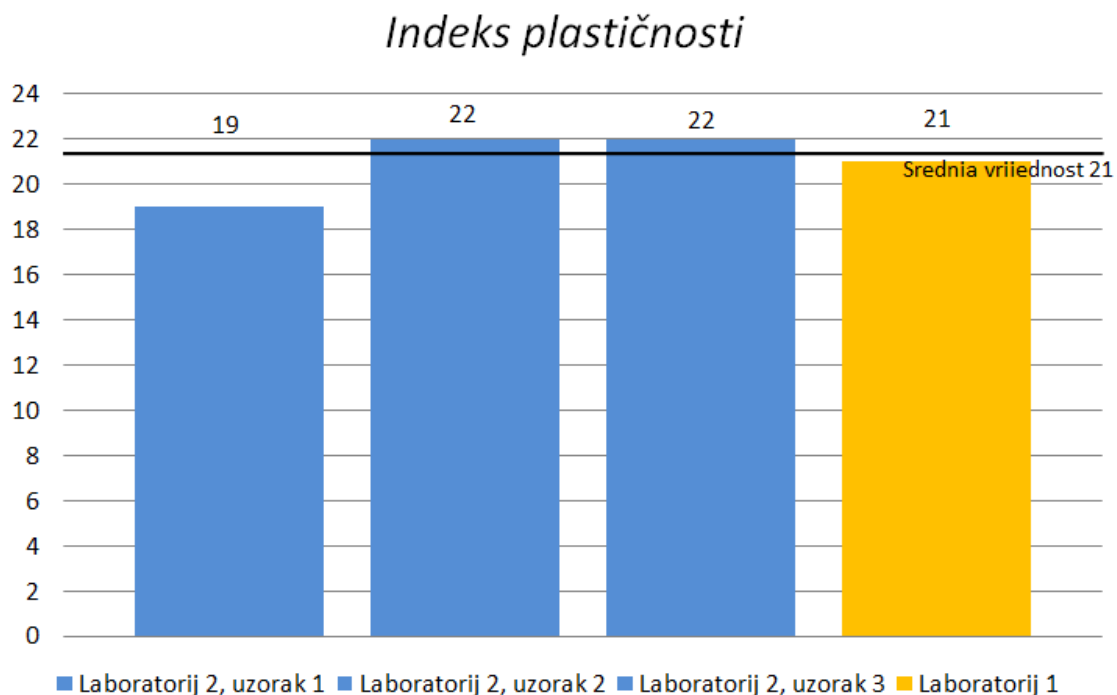
Za određivanje granice plastičnosti potrebno je uzeti 20 g od uzorka koji se pripremi u mekoplastičnom stanju. Grumeni materijala se valjaju, na neupijajućoj podlozi dok se ne postigne promjer od 3 mm (slika 3-6). Kod valjčići te debljine trebale bi se pojaviti pukotine. Ukoliko se pukotine ne pojave, potrebno je valjčiće ponovno stisnuti u grumen te valjati, jer se na taj način oduzima voda uzorku. Valjčiće s pukotinama stavljamo u zasebne posudice i odredi im se vlažnost. Potrebno je napuniti dvije posudice uzorkom, približno po 6 g uzorka u svakoj posudici. Odstupanje u vlažnosti između dva mjerenja ne smije biti veće od 1%.



Slika 3-6. Priprema valjčića

### ***Analiza rezultata Atterbergovih granica***

Granice plastičnih stanja na uzorku modelarske gline ispitane su na jednom uzorku u Laboratoriju 1 i na tri uzorka u Laboratoriju 2. Ispitivanje se provodilo u oba laboratorija prema normi ASTM 4318 – 10, korištenjem druge opreme uz drugog ispitivača.

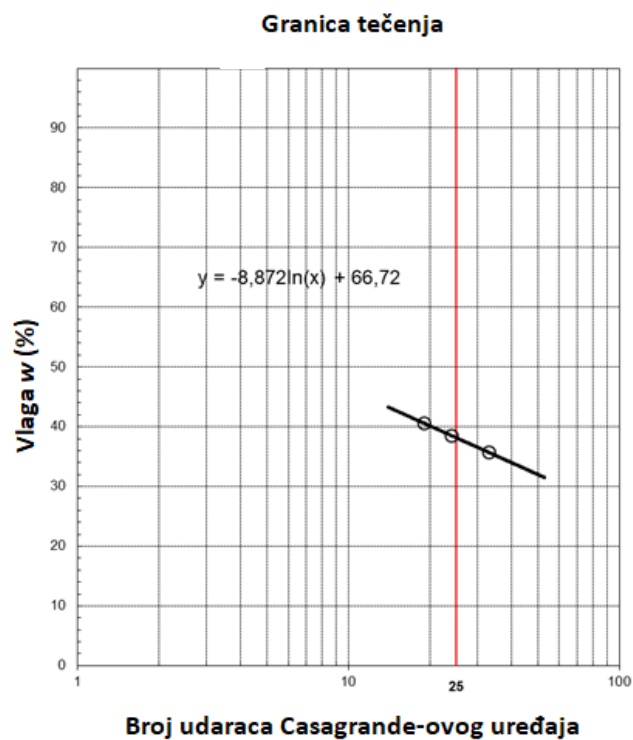


Slika 3-7. Vrijednosti rezultata indeksa plastičnosti

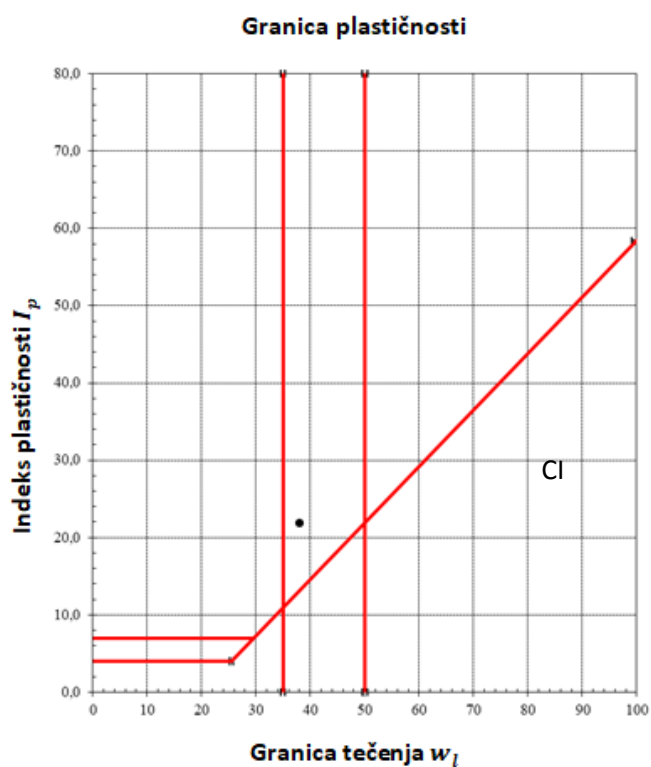
Analizom rezultata ispitivanja granica plastičnosti, uzorak možemo klasificirati kao glinu srednje plastičnosti (slika 3-7). Prema normi ASTM 4318 – 10, razlika rezultata između dva laboratorija ne smije biti veća od 5%. Srednja vrijednost indeksa plastičnosti dobivena u Laboratoriju 2 je 21 %, ista vrijednost dobivena je i u Laboratoriju 1, na temelju čega možemo zaključiti da nema značajnijih odstupanja u dobivenim vrijednostima. Kao primjer granica plastičnosti prikazane su vrijednosti iz Laboratorija 2, uzorak 3 (tablica 3-1, slika 3-8 i slika 3-9)

Tablica 3-1. Primjer dobivenih vrijednosti indeksnih pokazatelja na uzorku Laboratorij 2, uzorak 3

<i>Granica tečenja, <math>w_L(\%)</math>:</i>	<b>38,0</b>
<i>Granica plastičnosti, <math>w_P(\%)</math>:</i>	<b>16,0</b>
<i>Prirodna vlažnost, <math>w_0(\%)</math>:</i>	<b>21,1</b>
<i>Indeks plastičnosti, <math>I_P(\%)</math>:</i>	<b>22,0</b>
<i>Indeks konzistencije, <math>I_C</math>:</i>	<b>0,78</b>



Slika 3-8. Primjer dobivenog rezultata granice tečenja na uzorku Laboratorij 2, uzorak 3.

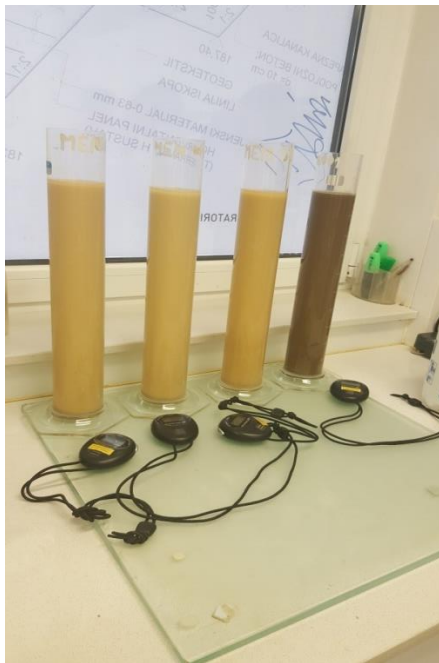


Slika 3-9. Klasifikacija uzorka iz Laboratorija 2, uzorak 3 pomoću dijagrama plastičnosti

### 3.1.3. Određivanje granulometrijskog sastava

Postupak ispitivanja granulometrijskog sastava izvodi se prema normi ASTM D 422-63 (2007). Ispitivanje se sastoji od procesa sijanja i areometriranja. Uzorak koji je korišten za izradu ovog rada je modelarska glina, na kojoj je zbog veličine zrna uzorka, proveden samo postupak areometriranje.

Areometriranje je metoda određivanja granulometrijskog sastava tla za materijal koji sadrži zrna manja od 0,06 mm (prah, glina). Budući da tako sitne čestice nije moguće sijati (nisu vidljive prostim okom), veličina i postotak pojedinih frakcija određuju se neizravno, mjerenjem gustoće suspenzije u određenim vremenskim intervalima (slika 3-10), primjenjujući tzv. Stokesov zakon. Stokesovim zakonom se definira brzina padanja zrnaca u mirnoj tekućini koja je to veća što su čestice krupnije.

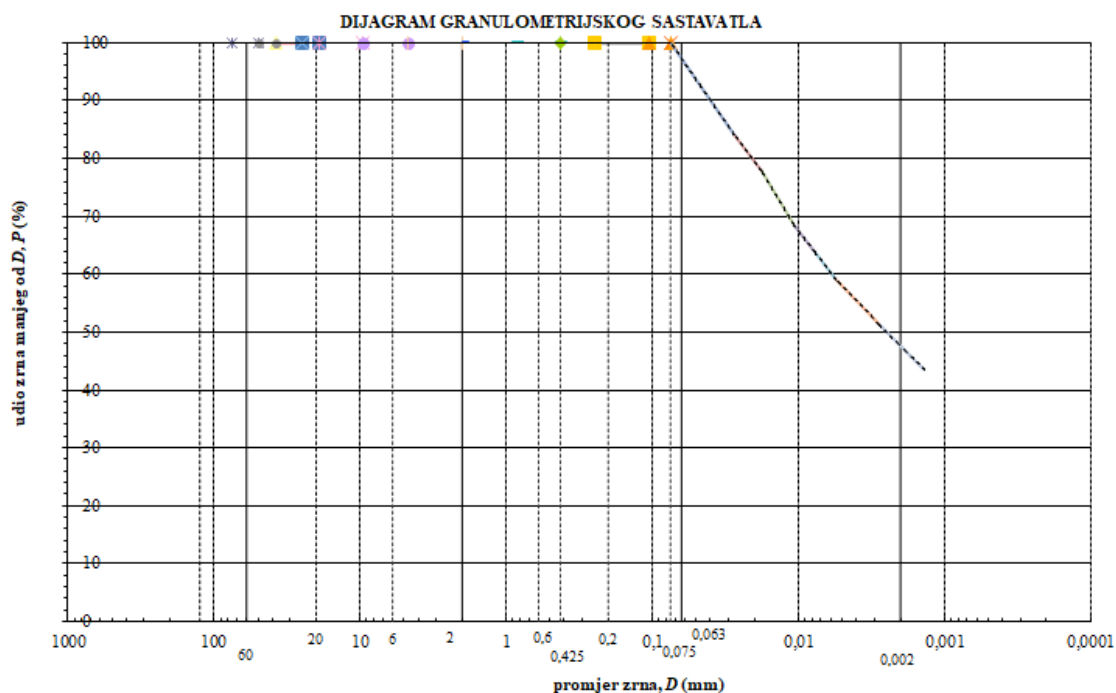


Slika 3-10. Postupak areometriranja

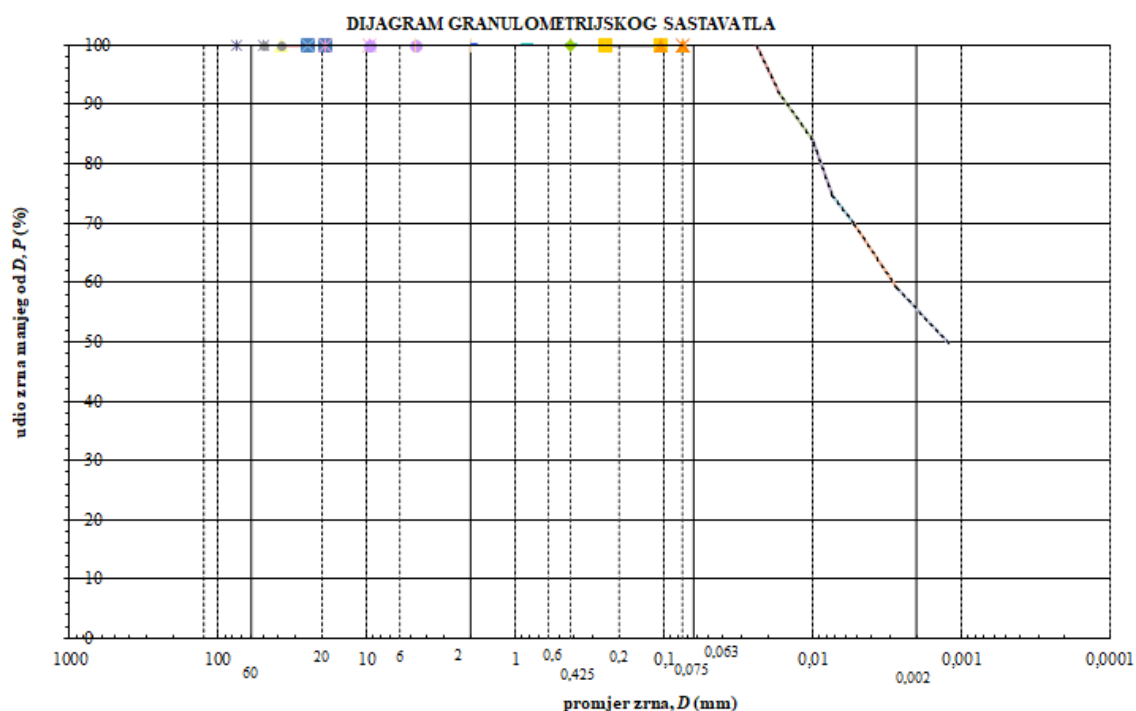
#### *Analiza rezultata areometriranja*

Ispitivanje areometriranja proveden je na uzorku modelarske gline. Ispitan je po jedan uzorak u Laboratoriju 1 i Laboratoriju 2. Ispitivanje se provodilo u oba laboratorija prema

normi ASTM D 422-63 (2007), korištenjem druge opreme uz drugog ispitivača. Rezultati areometriranja prikazani su na slikama 3-11 i 3-12. U Laboratoriju 2 dobiven je postotak gline od 47,6% dok je u Laboratoriju 1 postotak gline u uzorku 55,3 %, što je odstupanje od 7,7%. Dobiveni rezultat ulazi u dozvoljeno odstupanje između dva laboratorija, koje prema korištenoj normi ASTM D 422-63 (2007) iznosi 14%.



Slika 3-11. Rezultat areometriranja u Laboratoriju 1



Slika 3-12. Rezultat areometriranja u Laboratoriju 2

## 3.2 HOMOGENOST UZORKA

Međulaboratorijska usporedba vršila se na uzorku modelarske gline. Da bi se mogle usporediti značajke materijala, potrebno je dokazati homogenost uzorka. U ovom radu, homogenost uzorka određivala se na rezultatima ispitivanja vlažnosti te zapreminske težine.

### 3.2.1. Određivanje vlažnosti

Vlažnost uzorka određena je prema normi ASTM D 2216-10. Uzorak se usitni i stavi u prethodno izvaganu posudicu (slika 3-13). Važe se masa posudica s vlažnim uzorkom i stavi na sušenje na  $105^{\circ}\text{C}$  -  $110^{\circ}\text{C}$  (slika 3-14). Nakon 24 sata važe se posudica sa suhim uzorkom.



$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad [\%] \quad (3-5)$$

$$m_w = m - m_s \quad [g] \quad (3-6)$$

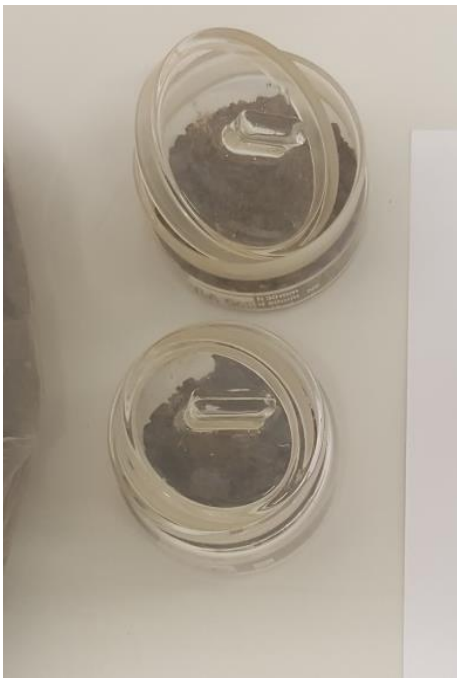
gdje je:

$w$  - vlažnost

$m_w$  - masa vode

$m_s$  - masa suhog uzorka

$m$  - masa vlažnog uzorka.



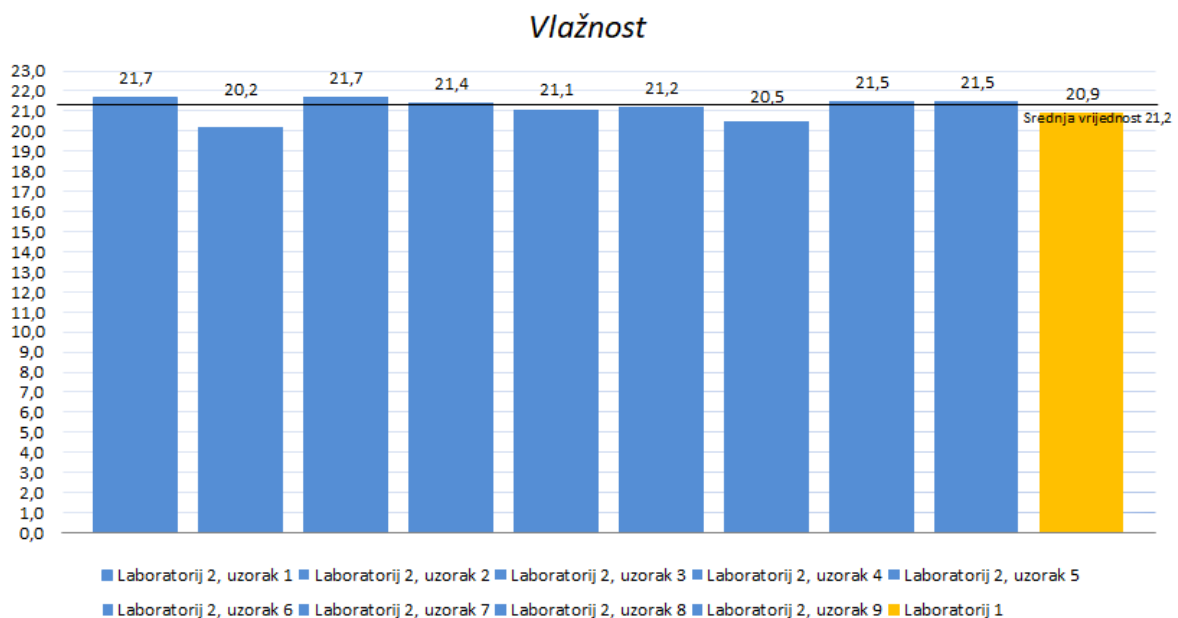
Slika 3-13. Posudica s uzorkom za određivanje vlažnosti



Slika 3-14. Sušionik

### *Analiza rezultata određivanja vlažnosti*

Određivanje vlažnosti provedeno je na uzorku modelarske gline. Ispitan je jedan uzorak u Laboratoriju 1 te devet uzoraka u Laboratoriju 2. Ispitivanje se provodilo u oba laboratorija prema normi ASTM D 2216-10, korištenjem druge opreme uz drugog ispitivača.



Slika 3-15. Vrijednosti rezultata vlažnosti

Dobivena srednja vrijednost unutar Laboratorija 2 iznosi 21,2 %, dok je dobivena vrijednost vlažnosti Laboratorija 1 20,9% (slika 3-15).

### 3.2.2. Određivanje zapreminske težine

Zapreminska težina je određena korištenjem podataka iz pokusa izravnog posmika (slika 3-16). Pomoću tih podataka poznata je masa uzorka te dimenzije uzorka.

$$\gamma = \frac{m \times g}{V} = \rho \times g \quad \left[ \frac{kN}{m^3} \right] \quad (3-7)$$

gdje je:

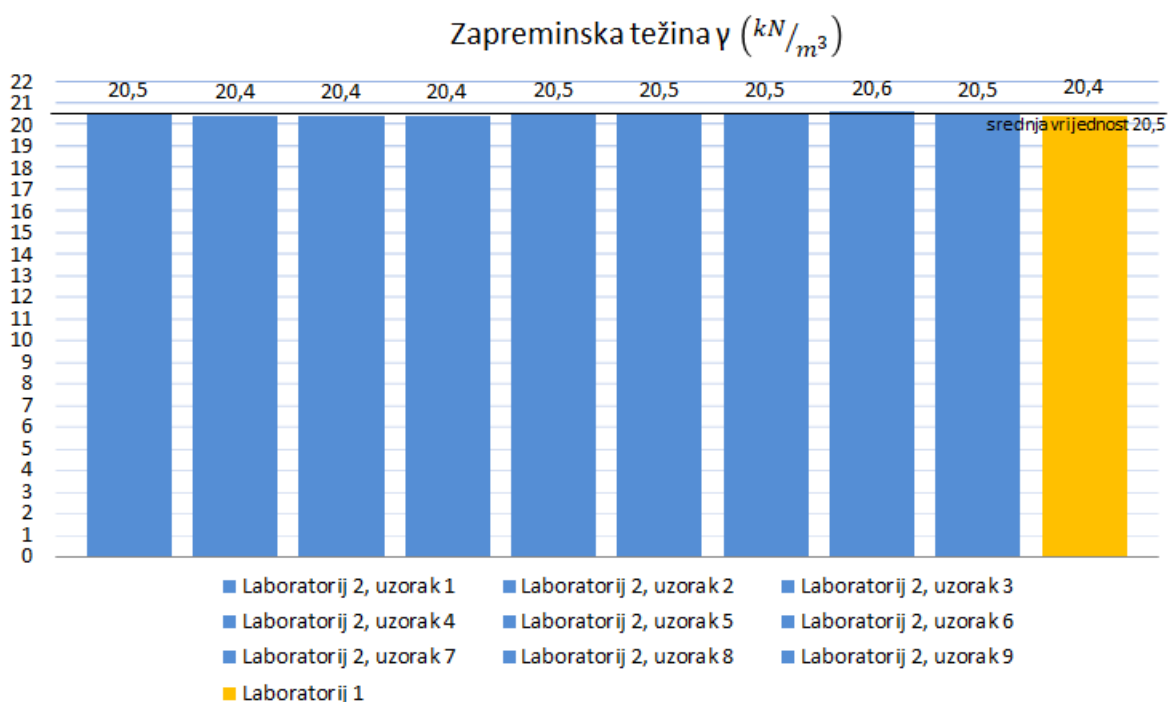
m – masa uzorka	[g]
g – akceleracija sile teže	$\left[ \frac{m}{s^2} \right]$
$\rho$ – gustoća uzorka	$\left[ \frac{g}{m^3} \right]$
V – volumen uzorka	$[m^3]$



Slika 3-16. Uzorak ugrađen u prsten

### *Analiza rezultata zapreminske težine*

Određivanje zepreminske težine provedeno je na uzorku modelarske gline. Ispitan je jedan uzorak u Laboratoriju 1 te devet uzoraka u Laboratoriju 2. Ispitivanje se provodilo u oba laboratorija prema normi HRS CEN ISO/TS 17892-2, uz korištenje druge opreme i drugog ispitivača.

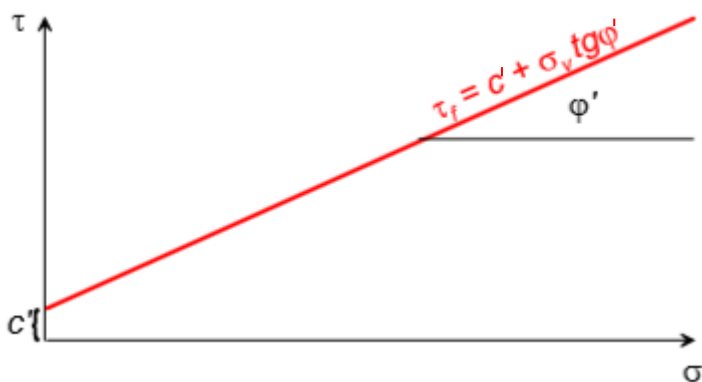


Slika 3-17. Rezultati ispitivanja zapreminske težine

Dobivena srednja vrijednost zepreminske težine u Laboratoriju 2 iznosi 20,5 kN/m<sup>3</sup>, kao i srednja vrijednost između Laboratorija 1 i Laboratorija 2 (slika 3-17). Na temelju analize rezultata određivanja vlažnosti te određivanja zapreminske težine, moguće je prikazati da uzorak, kada je podijeljen na laboratorijske uzorke ima približno jednake vrijednosti prirodne vlažnosti i zapreminske težine, te se može reći da je uzorak homogen.

### 3.3. ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE MATERIJALA METODOM IZRAVNOG POSMIKA

Čvrstoća tla predstavlja jedan od najvažnijih podataka prilikom projektiranja geotehničkih zahvata. Čvrstoću materijala moguće je ispitati direktnim mjerenjem u laboratoriju na neporemećenim uzorcima ili pomoću korelacije s in situ ispitivanjima. Moguće ju je odrediti ispitivanjima u uređaju za izravni posmik te u troosnom uređaju. Prilikom izrade ovog rada, čvrstoća materijala se određivala u uređaju za izravni posmik. Uređaj je vrlo sličan edometru, razlika je u tome što je kod uređaja za izravni posmik, kutija s uzorkom sastavljena od dva dijela, s čime se kasnije može posmaknuti do sloma uzorka. Na uzorak se djeluje normalnom silom, a smiče se posmičnom silom. Prilikom ispitivanja mjere se: normalna sila, horizontalne deformacije, vertikalni pomak i sila posmika. Ispitivanje se provodi u dvije faze, prva je faza konsolidacije, druga je faza posmika. Za definiranje posmične čvrstoće se, u mehanici tla najčešće koristi Mohr-Coulombov zakon čvrstoće. Eksperimentalno se može pokazati da je anvelopa naprezanja gotovo ravna linija, tako da se za praktične probleme može aproksimirati pravcem. Taj se pravac naziva pravcem čvrstoće, a prema teorijama čvrstoće odgovara Mohr-Coulombovom zakonu. Pravac čvrstoće određen je s dva parametra, kohezijom  $c$  i kutom unutarnjeg trenja  $\varphi$  (slika 3-18).



Slika 3-18. Pravac čvrstoće i parametri čvrstoće

Za određivanje Mohr-Coulombovog pravca čvrstoće, dovoljno bi bilo ispitati dva uzorka s različitim normalnim napreznjima, ali se radi sigurnosti ispituju po tri uzorka od iste vrste materijala. Normalna naprezanja se nanose se na početku ispitivanja, a treba ih odabrati tako, da u crtane u dijagram budu dovoljno udaljene kako bi se mogao odrediti Mohr-Coulombov pravac čvrstoće. U uređaju za izravni posmik najčešće se ispituju relativno propusni materijali jer nema mogućnosti mjerenja pornog tlaka. Iz tog razloga, faza smicanja se odvija vrlo sporo kako bi se omogućila disipacija pornog tlaka (Kvasnička i Domitrović, 2007).

Uređaj za izravni posmik ima slijedeće nedostatke:

- ne može se mjeriti porni tlak pa je teško razlikovati ukupna i efektivna naprezanja, te drenirano i nedrenirano stanje,
- u toku ispitivanja površina presjeka se smanjuje, pa je otežan proračun stanja naprezanja na toj površini,
- kutija u kojoj se smiče uzorak ima trenje između okvira, koje se ne može izmjeriti, što uzrokuje greške u mjerenju,
- na uzorak se mogu, prije ispitivanja, postaviti samo stanja naprezanja koja odgovaraju  $K_0$  stanju (jer je spriječeno bočno širenje), dok se ona u tlu mogu pojaviti u različitim varijantama.

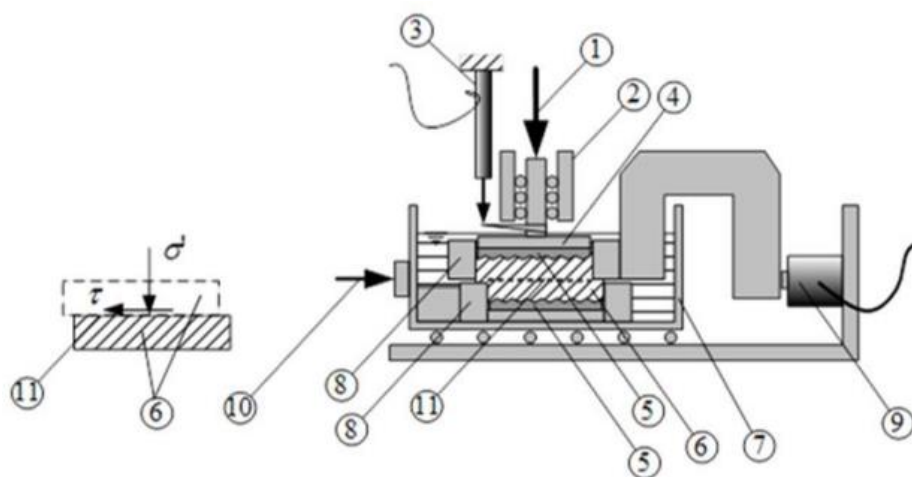
### 3.3.1. Opis norme

Norma ASTM D3080/3080M – 11 koristi se u svrhu određivanja posmične čvrstoće tla u konsolidiranom dreniranom stanju. Uzorci koji se ugrađuju u uređaj imaju relativno malu visinu tj. put dreniranja, što im omogućava da se višak tlakova brže disipira, čime je i samo ispitivanje i dobivanje rezultata brže nego kod drugih metoda. Rezultati ispitivanja primjenjivi su za određivanje čvrstoće u situaciji u kojoj se dogodila potpuna konsolidacija pod već postojećim normalnim napreznjem. Prema zakonu trenja, čvrstoća raste s povećanjem normalnih naprezanja. Tijekom ispitivanja u pokusu izravnog smicanja dolazi do rotacije glavnih naprezanja, što može ali i ne mora realno prikazati terenske uvjete. Slom će se prema konstrukciji uređaja dogoditi u sredini ili u blizini sredine uređaja, a ne nužno na najslabijem dijelu uzorka. Posmična naprezanja i deformacije nisu

ravnomjerno raspoređeni po uzorku, te odgovarajuća visina nije definirana za izračunavanje posmičnih deformacija ili drugih veličina. Prema normi se ispitivanje provodi na minimalno tri uzorka pri različitim vertikalnim opterećenjima. Iznosi vertikalnih naprezanja trebali bi obuhvatiti mogući raspon normalnih naprezanja koja se u razmatranom problemu mogu javiti na terenu, te bi trebale biti dovoljno udaljene da se može preciznije povući pravac čvrstoće. Određivanjem vlažnosti i klasifikacijskih svojstava, može se utvrditi sličnost uzoraka koji će se ugraditi i kasnije izvršiti usporedba rezultata.

### **3.3.2. Uređaj za izravni posmik**

Uređaj za izravni posmik (slika 3-19) sastavljen je od dvije ćelije koje se mogu međusobno posmaknuti do sloma uzorka. Uzorak se u uređaju za izravni posmik ugrađuje između dvije porozne pločice. Omogućena je primjena normalnog i posmičnog naprezanja na uzorak, potapanje uzorka, mjerenje horizontalnog i vertikalnog pomaka i dreniranje vode kroz porozne pločice na vrhu i dnu. Okviri u koje se ugrađuje uzorak trebaju biti kruti da spriječe iskrivljenje uzorka tijekom smicanja. Uređaj se najčešće radi od nehrđajućeg čelika, bronce, aluminija i sl. Kutija u koju se ugrađuje uzorak može biti kružnog ili kvadratnog oblika, s otvorom na vrhu i dnu da se omogući dreniranje uzorka. Sastoji se od dva dijela jednake debljine, međusobno pričvršćene vijcima. Najmanji promjer ili širina uzorka treba zadovoljiti sljedeći kriterij: ili njegov promjer mora biti najmanje 50 mm, ili biti najmanje deset puta veći od promjera najvećeg zrna. Za ugradnju uzorka, koristi se promjer koji je primjenom ova dva kriterija veći. Najmanja debljina uzorka koja se koristi je 13 mm, a ne smije biti manja od šest puta promjera najvećeg zrna. Omjer između promjera i debljine uzorka ne bi trebao biti manji od 2:1. Porozne pločice osim što omogućavaju drenažu, služe i za prijenos posmične sile iz unutrašnjosti uzorka prema donjoj ili gornjoj površini. U svom sastavu sadrže silicijev karbid, aluminijev oksid, ili metale koji su otporni na koroziju. Promjer ili širina bi trebala biti 0,2 do 0,5 mm manja od unutrašnjosti posude za smicanje. Točnost uređaja za mjerenje normalne i posmične sile mora biti do 2,5 N ili 1% od normalne ili posmične sile. Za analizu se koristi točnost koja daje veću vrijednost. Mjerenje promjene debljine uzorka mjeri se s preciznošću od 0,002 mm, dok se relativni bočni pomak mjeri s preciznošću od 0,02 mm.



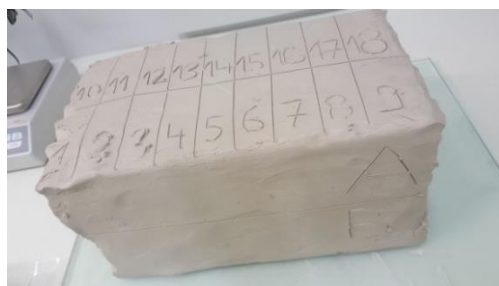
Slika 3-19. Dijelovi uređaja za izravni posmik

Legenda: 1- uređaj za nametanje vertikalne sile  $V$ , 2- vodilice uređaja za vertikalno opterećenje koje sprječavaju nagnjanje gornje ploče, 3- osjetilo vertikalnog pomaka gornje ploče, 4- gornja ploča, 5- nazubljena porozna pločica, 6- uzorak tla, 7- pomična posuda na ležajevima, 8- gornji (nepomični) i donji (pomični) okvir za uzorak potopljen u vodi, 9- osjetilo horizontalne sile  $H$ , 10- uređaj za nametanje jednoliko rastućeg horizontalnog pomaka i 11- ploha sloma.

### 3.3.3. Priprema uzorka i postupak

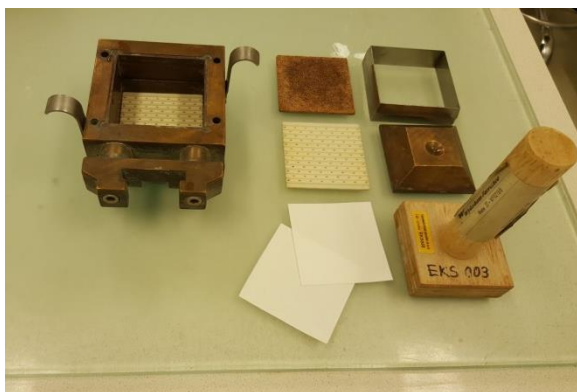
Priprema uzoraka ovisi o vrsti uzorka. Uzorci mogu biti neporemećeni, dobiveni uzorkovanjem na terenu pomoću tankostjenog cilindra. Uzorcima treba oprezno rukovati kako bi se smanjila moguća oštećenja, promjene u poprečnom presjeku ili gubitak vode, uzrokovan vanjskim uzročnicima. U slučaju da se uzorak ošteti, potrebno je odvojiti oštećeni dio. Uzorak koji je odabran za ispitivanje, treba biti dovoljno velik da se omogući dobivanje minimalno tri ispitna uzorka (slika 3-20).





Slika 3-20.(a) Uzorak modelarske gline proizveden za komercijalnu upotrebu, (b) Podjela uzorka

Prilikom ugradnje uzorka, potrebno ga je lagano utiskivati u prsten, s povremenim odstranjivanjem viška materijala da se smanji pritisak na uzorak (slika 3-21 (a)). Kada je uzorak utisnut u prsten potrebno je otkloniti višak te ga poravnati s rubovima prstena (slika 3-21 (b)). Za proračun, treba izvagati masu prstena, te masu prstena s uzorkom.



Slika 3-21. (a) Potreban pribor prilikom ugradnje, (b) Uzorak ugrađen u prsten

Postupak ispitivanja započinje sastavljanjem ćelije, umetanjem poroznih pločica, filter papira i uzorka u ćeliju (slika 3-22(a) i (b)). Ćelija se postavlja na klupu s osjetilima te se namještaju uređaji za praćenje sile, vertikalnog i horizontalnog pomaka (slika 3-23). Postavlja se odgovarajuće opterećenje te prva faza, faza konsolidacije započinje.



Slika 3-22. (a) Utiskivanje uzorka u kalup, (b) Ugrađen uzorak u kalup



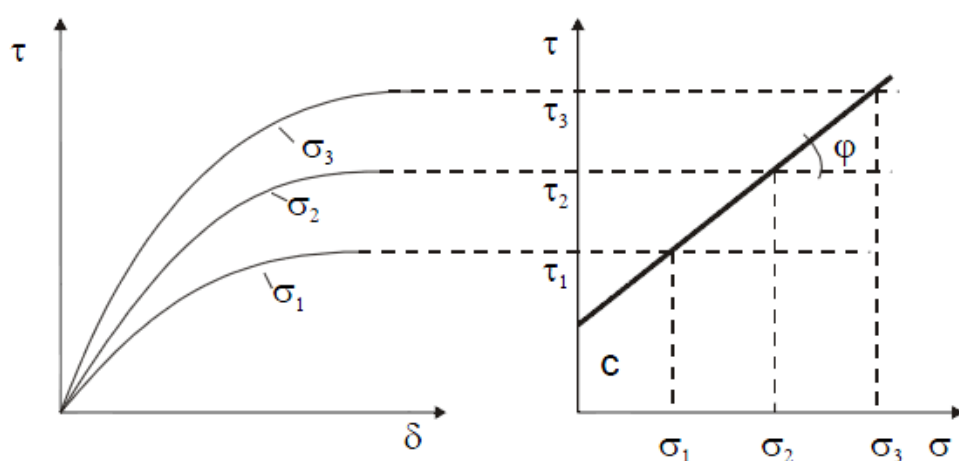
Slika 3-23. Postavljen kalup u uređaj za izravan posmik.

Ovisno o vrsti materijala, krutosti i konačnom naprezanju ovisi i broj inkremenata da bi se postigla 100% konsolidacija. Opterećenje treba biti dovoljno malo da se spriječi istiskivanje uzorka. Kod krućih materijala uglavnom je dovoljan samo jedan inkrement, dok kod mekših materijala postoji niz inkremenata. Konsolidacija traje približno 24 sata. Kada je postupak konsolidacije završen potrebno je pomoću podataka iz faze konsolidacije

izračunati najmanju potrebnu brzinu smicanja (jednadžba 3-8), koja je važna kako bi se osigurali drenirani uvjeti odnosno da bismo mogli pretpostaviti da su efektivna naprezanja jednaka nametnutim ukupnim naprezanjima. Kada je završena faza konsolidacije započinje druga faza, posmik. U ovoj fazi mjere se horizontalni pomak i nametnuta posmična sila. Nakon završetka druge faze, uređaj se isključuje, uklanjaju se utezi, te se uzorak vadi iz ćelije, važe i stavlja na sušenje 24 sata na  $110^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3.4. Proračun

Rezultati mjerenja prikazuju se pomoću odnosa između ostvarenog posmičnog naprezanja i odgovarajućeg pomaka između dva dijela ćelije (slika 3-24). Posmično i normalno naprezanje na plohi na spoju dijelova ćelije računaju se prema izrazima 3-8 i 3-9, a brzina smicanja i postotak relativnog bočnog pomaka prema izrazima 3-10 i 3-11. Rezultati pokusa izravnog posmika mogu se prikazati totalnim naprezanjima koja su jednaka efektivnim kod pokusa s dovoljno sporom deformacijom, te prethodnom konsolidacijom i obostranim dreniranjem uzoraka. S promjenom normalnog naprezanja mijenja se i razvoj posmičnih naprezanja pri smicanju (slika 3-24).



Slika 3-24. Prikaz rezultata pokusa izravnog posmika

### Posmično naprezanje

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (3-8)$$

gdje je:

$\tau$  – posmično naprezanje [kPa]

T - posmična sila [kN]

A - površina [ $m^2$ ]

### Normalno naprezanje

$$\sigma_n = \frac{N}{A} \quad (3-9)$$

gdje je:

$\sigma_n$  – normalno naprezanje [kPa]

N- vertikalna sila [kN]

### Brzine smicanja

$$R_d = \frac{d_h}{t_e} \quad (3-10)$$

gdje je:

$R_d$  – brzina smicanja [ $mm/min$ ]

$d_h$  - relativni bočni pomak [mm]

$t_e$  - proteklo vrijeme [min]

### Postotak relativnog bočnog pomaka

$$P_d = 100 \times \frac{d_h}{D} \quad (3-11)$$

gdje je:

D – promjer uzorka [mm]

Za potpuni proračun potrebno je još dodatno izračunati: početnu vlažnost, početnu suhu gustoću i početni stupanj zasićenosti na temelju specifične težine, te volumen ukupnog uzorka. Volumen uzorka određuje se mjerenjem duljine ili promjera posude za smicanje i izmjerene debljine uzorka.

#### 4.ANALIZA REZULTATA IZRAVNOG POSMIKA

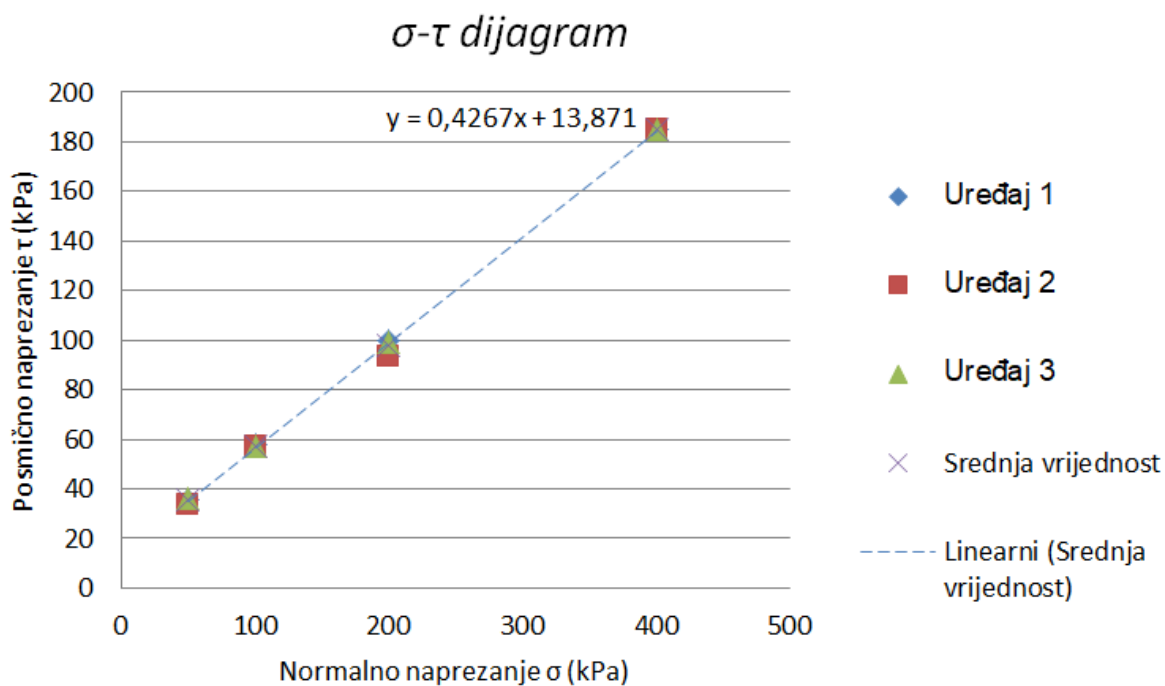
Ispitivanje posmične čvrstoće pokusom izravnog smicanja provedeno je u Laboratoriju 1 i u Laboratoriju 2 prema normi ASTM D 3080/3080M – 11. Unutar Laboratorija 2, ispitivanja su provodila dva ispitivača, svaki ispitivač je zasebno ispitao 12 uzoraka. U laboratoriju su postavljena tri uređaja za izravni posmik (slika 4-1), tako da su na svakom uređaju ugrađivana po četiri uzorka za različita opterećenja od 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa i 400 kPa. Rezultati koji su dobiveni unutar Laboratorija 2 promatrani su sa polazišta ponovljivosti, budući da se radi o istom ispitivaču te istim uvjetima rada. U Laboratoriju 1 ispitivanje je provodio jedan ispitivač na jednom uređaju za izravan posmik. Ukupno su ugrađena četiri uzorka za opterećenja 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa i 400 kPa. Rezultati dobiveni u oba laboratorija promatrani su sa polazišta obnovljivosti, budući da se radi o istoj normi, različitim ispitivačem i različitim uvjetima rada. Uzorak koji je ugrađivan je modelarska glina, kojoj je prethodnim ispitivanjima, te usporedbom dobivenih rezultata dokazana homogenost.



Slika 4-1. Tri uređaja za izravni posmik u Laboratoriju 2

#### 4.1. Rezultati ispitivanja za prvog ispitivača

Prvi ispitivač je proveo ispitivanje u Laboratoriju 2. Proveo je ukupno 12 ispitivanja, na svakom od tri uređaja provedena su ispitivanja s opterećenjima od 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa i 400 kPa. Iz dobivenih rezultata, za svako početno opterećenje, izračunate su srednje vrijednosti te je na temelju njih određen pravac čvrstoće (slika 4-2). Rezultati ispitivanja koje je proveo prvi ispitivač u nastavku se koriste kao referentna vrijednost, s obzirom da se radi o ispitivaču s najdužim iskustvom rada u laboratoriju. Vrijednost parametara čvrstoće prvog ispitivača su:  $c = 13,87$  i  $\varphi = 23,6^\circ$ .

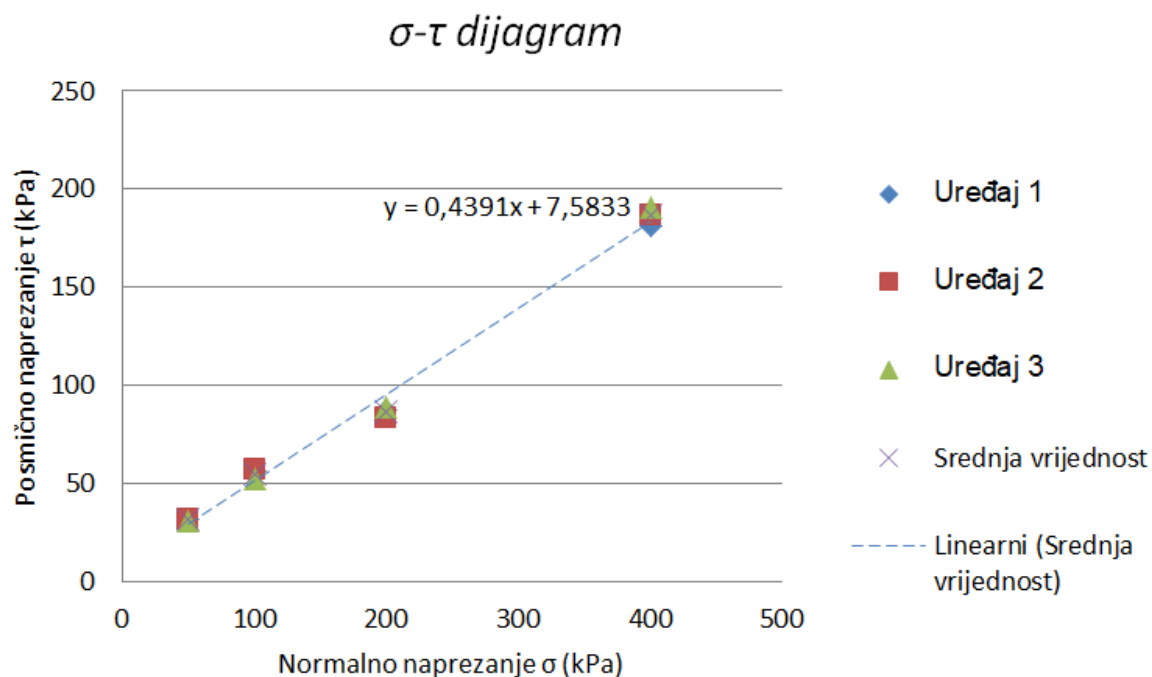


Slika 4-2. Prikaz rezultata ipitivanja izravnog posmika od ispitivača 1 u Laboratoriju 2.

#### 4.2. Rezultati ispitivanja za drugog ispitivača

Drugi ispitivač je proveo ispitivanje u Laboratoriju 2. Proveo je ukupno 12 ispitivanja, na svakom od tri uređaja provedena su ispitivanja s opterećenjima od 50 kPa,

100 kPa, 200 kPa i 400 kPa. Iz dobivenih rezultata, za svako početno opterećenje, izračunate su srednje vrijednosti te je na temelju njih određen pravac čvrstoće (slika 4-3). Dobivene vrijednosti parametara čvrstoće drugog ispitivača su:  $c = 7,58$  i  $\varphi = 23,4^\circ$ .

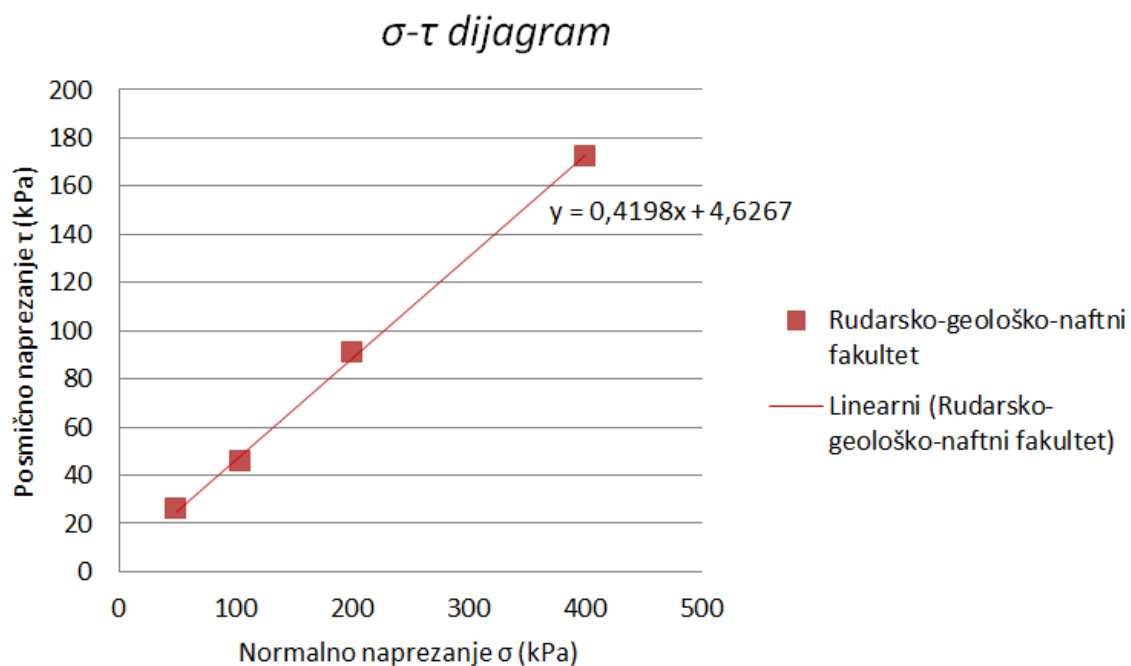


Slika 4-3. Prikaz rezultata ispitivanja izravnog posmika od ispitivača 2 u Laboratoriju 2.

#### 4.3. Rezultati ispitivanja za trećeg ispitivača

Treći ispitivač je proveo ispitivanja u Laboratoriju 1. Proveo je sveukupno četiri ispitivanja s različitim početnim naprezanjem, od 50kPa, 100kPa, 200kPa i 400kPa. Rezultati su prikazani na slici 4-4. Vrijednosti rezultata unutarnjeg kuta trenja i kohezije, za trećeg ispitivača iznose:  $c = 4,62$  i  $\varphi = 22,5^\circ$ .

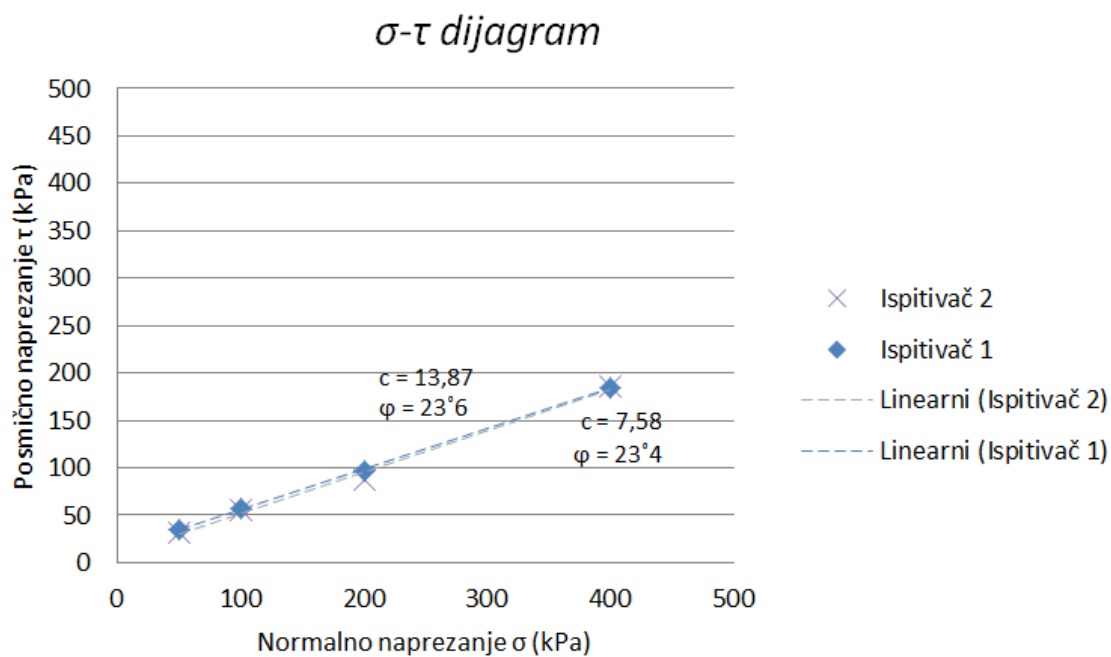




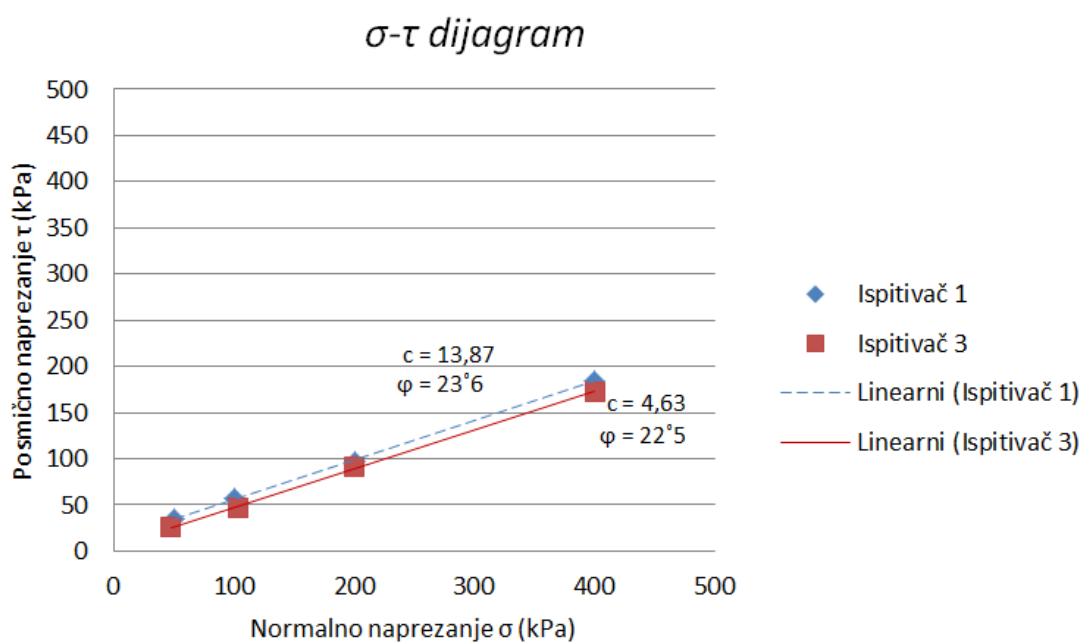
Slika 4-4. Prikaz rezultata ispitivanja izravnog posmika od ispitivača 3 u Laboratoriju 1.

#### 4.4. Usporedba ispitivanja rezultata ispitivanja izravnog posmika

Usporedba rezultata ispitivanja izravnog posmika određena je unutar Laboratorija 2 između Ispitivača 1 i Ispitivača 2 (slika 4-5), te je napravljena usporedba između Laboratoriju 1 i Laboratorija 2 (slika 4-6), koristeći rezultate Ispitivača 1 i Ispitivača 3.



Slika 4-5. Usporedba rezultata između Ispitivača 1 i Ispitivača 2.



Slika 4-6. Usporedba rezultata između Ispitivača 1 i Ispitivača 3.

Na temelju dobivenih i prikaznih rezultata ispitivanja izravnog posmika, u Laboratoriju 1 i Laboratoriju 2, može se zaključiti da su odstupanja u rezultatima ispitivanja između dva

laboratorija veća nego odstupanja unutar jednog laboratorija. Prema uvjetima ponovljivosti, promatrani su rezultati unutar Laboratorija 2, zasebno od Ispitivača 1 i Ispitivača 2. Iako je prema načelima ponovljivosti, navedeno da se koristi jedan uređaj, jedan ispitivač te ista metoda ispitivanja, u Laboratoriju 2 su se koristila tri uređaja, što je dopustivo jer se koristi isti mjerni sustav te s obzirom da se pomoću umjernica i internih postupaka kontrole pokazalo da svi mjerači sile jednako mjere. S aspekta obnovljivosti promatrani su rezultati između Laboratorija 1 i Laboratorija 2. Ispitivanja su provodili Ispitivač 1 i Ispitivač 3. Različiti ispitivači, različiti uređaji te uvjeti unutar laboratorija, uzrokovali su nešto veća odstupanja u dobivenim rezultatima.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovome radu prikazani su rezultati laboratorijskih ispitivanja koja su provedena na uzorku gline u svrhu njegove karakterizacije, provjere homogenosti i određivanja posmične čvrstoće pokusom izravnog smicanja. Izabrana je modelarska glina koja se koristi za komercijalnu upotrebu, obzirom da se moglo pretpostaviti kako se radi o homogenom materijalu pogodnom za kontrolu kvalitete ispitivanja prilikom čega je potrebno ispitati veći broj uzoraka s jednakim svojstvima. Cilj ovog rada bio je provesti i usporediti dobivene rezultate unutar jednog laboratorija između dva ispitivača, te između dva laboratorija, koja imaju različite ispitivače, različitu opremu za korištenje ali su ispitivanja provedena prema istim normama i na istom uzorku. Ispitivanja su se provodila u Geomehaničkom laboratoriju na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu (Laboratorij 1) i u Laboratoriju za ispitivanje tla i stijena trgovačkog društva Geotehnički studio d.o.o. (Laboratorij 2). Sva su ispitivanja provedena prema istima normama u oba laboratorija. Rezultati su analizirani s polazišta ponovljivosti i obnovljivosti te međulaboratorijske usporedbe.

U prvom koraku pristupilo se karakterizaciji modelarske gline. Ispitivanja su paralelno provedena u oba laboratorija. S ciljem karakterizacije uzorka modelarske gline provedena su ispitivanja fizikalnih svojstava (granulometrijskog sastava i gustoće čvrstih čestica), Atterbergovih granica (granica tečenja i indeks plastičnosti) i određivanje homogenosti uzorka (određivanje zapreminske težine i vlažnosti). Na temelju Atterbergovih granica, uzorak modelarske gline klasificiran je kao glina srednje plastičnosti, sa srednjom vrijednosti indeksa plastičnosti 21. Srednja vrijednost gustoće čvrstih čestica iznosi  $2,77 \text{ g/cm}^3$ , vlažnosti 21,2% te zapreminske težine  $20,5 \text{ kN/m}^3$ .

U drugom koraku provedeno je ispitivanje čvrstoće materijala u uređaju za izravni posmik. Ispitivanja su provedena u oba laboratorija, te je napravljena usporedba rezultata unutar laboratorija 2 (Geotehnički studio d.o.o.) i usporedba rezultata između oba laboratorija (laboratorij 1 – RGN-fakultet i laboratorij 2 – Geotehnički studio d.o.o.). Analizom rezultata ispitivanja vidljivo je da su odstupanja rezultata unutar jednog laboratorija manja, nego kod usporedbe između dva laboratorija. Unutar jednog laboratorija ima manje značajki koje mogu utjecati na razliku u rezultatima, ali razlike su ipak vidljive budući da

se radi o različitim ispitivačima. Razlika u rezultatima između dva laboratorija je veća, jer osim utjecaja ispitivača postoje i faktori kao što su kalibracija uređaja, uvjeti u laboratoriju (temperatura, tlak, vlažnost zraka), i druga oprema, koji mogu imati značajniji utjecaj na rezultate. Važno je ipak napomenuti da se odstupanja u rezultatima međulaboratorijskog ispitivanja, provedenog sukladno zahtjevima norme ASTM E691 (osoba koja provodi ispitivanje, korištena oprema, kalibracija uređaja, te laboratorijski uvjeti), koja su uočena i zabilježena nalaze unutar dopuštenih granica.

Općenito gledano, može se konstatirati da su provedena ispitivanja i analiza, unutar laboratorija te između dva laboratorija, vrlo korisna. Ona mogu pokazati razinu kvalitete ispitivanja pojedinog laboratorija ili upućivati na eventualne nedostatke prilikom izvođenja ispitivanja koje je potrebno sukladno normi otkloniti. Na temelju obrađenih rezultata, najviša odstupanja su se pojavila kod pokusa izravnog posmika, a još detaljnije veća odstupanja primjećuju se za koheziju nego za kut unutarnjeg trenja. Takva su odstupanja uzrokovana većim brojem utjecajnih faktora poput: dinamike opterećenja (odjednom ili u inkrementima), vlažnost pri ugradnji uzorka, gustoća tla, trenje, mogućnost dreniranja uzorka (filtrar papir, porozne pločice), i sl. Za još detaljniju analizu bilo bi potrebno napraviti veći broj ispitivanja, kako je i propisano normom za međulaboratorijsku usporedbu, te za ponovljivost i obnovljivost rezultata. To bi omogućilo provedbu detaljnije statističke analize rezultata, te precizniji uvid u kvalitetu ispitivanja laboratorija.

## 6. LITERATURA

Kvasnička, P., Domitrović, D. (2007): Mehanika tla, interna skripta, RGNF, Zagreb.

HAA, 2015: Pravila za međulaboratorijske usporedbe HAA-Pr- 2/6, Hrvatska akreditacijska agencija, Zagreb.

GRGIĆ, Z., 2014. Međulaboratorijska usporedba. Glasilo Hrvatskih laboratorija, stranice 14 – 17.

ASTM, 2014, D854 – 14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM.

ASTM, 1999, E691 – 99, Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method, ASTM.

ASTM, 2010, D4318 – 10, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM.

ASTM, 1963, D422 – 63, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM.

ASTM, 2010, D2216 – 10, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM.

ASTM, 2011, D3080/D3080 M – 11, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM.

HZN, 2014, EN ISO 17892 – 2, Određivanje prostorne gustoće, Zagreb: Hrvatski zavod za norme.